

中国报废汽车中铂族金属回收潜力估算

张安迎¹, 童昕^{1*}, 曾现来² (1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 基于 Gompertz 模型预测中国 2018~2050 年民用汽车的社会保有量;在此基础上,采用物质流分析方法估算得出我国汽车高峰报废年限大约为 9a。然后,通过市场供给 A 模型预测我国 2018~2025 年汽车报废量,结果显示,我国汽车报废量到 2025 年将达到 2535.05 万辆,并且地理空间分布极不均衡。基于上述汽车报废量的时空分布,测算不同技术发展情景下废汽车三元催化剂中的铂族金属回收潜力和需求量。结果显示:如果按照当前催化剂消耗水平,全国铂族金属的需求量均在 2019 年达到峰值,铂钯铑分别达到 4.57, 65.70, 7.92t, 有望实现行业内闭环供应;如果以欧盟汽车尾气治理标准为目标,而现有汽车技术不发生根本变化,需求量将大幅增加,铂钯铑分别在 2020 年达到峰值 85.01, 109.38, 8.37t, 存在严重的供需矛盾。为此,建议在汽车生产者责任延伸制度中,关注废催化剂的回收和再生利用,以促进前端生产环节在不同技术选择中考虑稀贵金属的供给限制。

关键词: 报废汽车; 物质流分析; 三元催化剂; 铂族金属; 中国

中图分类号: X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)11-4821-10

Recycling potentials of Platinum-group metals from end-of-life vehicle in China. ZHANG An-ying^{1*}, TONG Xin¹, ZENG Xian-lai² (1.College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2.Guangzhou Bureau of Environmental Supervision, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2020,40(11): 4821~4830

Abstract: Based on the estimation of car ownership in China from 2018 to 2050 with Gompertz model, this research identified the average lifespan of cars in China as 9a by a time-series material flow analysis model. This result was used to estimate the amount of end-of-life vehicles (ELVs) in China to reach 25.35 million by 2025 with extreme uneven geographical distribution. The recycling potential of platinum group metals was calculated accordingly, and compared with various scenarios of demand. The results show that: according to current catalyst consumption level, the demand for platinum group metals in China peaked in 2019, where Pt, Pd and Rh reached 4.57, 65.70 and 7.92t. It is expected to achieve closed-loop supply in automobile industry. If the EU emission standards are applied in China, the demand for platinum group metals will increase significantly, which could lead to serious shortage of supply. The demand for Pt, Pd and Rh will reach 85.01, 109.38, 8.37t in 2020. In conclusion, we suggested to incorporate the recycling of waste catalysts in the extended producer responsibility system for cars.

Key words: end-of-life vehicle; material flow analysis; three-way catalyst; Platinum group metals; China

以三元催化剂(TWC)为代表的汽车尾气净化催化剂,是铂族金属(以铂钯铑为主)最重要的消费用途,2018 年在全球铂族金属消费量中占比高达 62%。截至 2019 年底,我国汽车保有量达 2.6 亿辆,位居世界首位^[1]。我国 6%~8%的铂,75%的钯和几乎所有铑都用于汽车尾气净化催化剂的制造^[2]。汽车消费的增长导致对铂族金属需求不断增加。但我国铂族金属资源匮乏,供需矛盾突出,进口依赖度高^[3]。同时,经过 10 多年的消费增长,我国正逐步进入汽车报废高峰时期。废尾气净化催化剂的不当回收和处置,带来的环境污染危害也引起关注^[4]。报废汽车尾气净化催化剂中铂族金属回收周期短,使用损耗低^[5],回收利用前景可观。为了有效促进汽车的生态设计,提高产品全生命周期的资源效率,系统降低汽车消费的环境影响,我国在 2017 年将汽车纳入进一步开展生产者责任延伸制度的重点产品领域。汽车尾气净化

催化剂中铂族金属的回收与再利用有必要纳入汽车产品整体循环经济体系建设范围之内。

近年来,报废汽车中再生资源回收潜力引起了很多学者的兴趣。学者们从物质流分析的角度出发,运用汽车行业动态代谢模型^[6],物质流代谢系统动力学模型^[7-8],物质流输入视角^[9],群体平衡模型和元素流分析^[10],等方法,对汽车中各类再生资源的回收潜力进行预测。

可以看出,对报废汽车中再生资源回收潜力的研究往往遵循以下路径:首先预测汽车保有量,继而通过相应的寿命分布预测汽车报废量,最后通过物质流分析等方法预测相应物质的回收潜力。然而,已有文献对催化剂中铂族金属的回收潜力和需求量

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1900101)

* 责任作者, 副教授, tongxin@urban.pku.edu.cn

预测,通常根据汽车生产,销售情况粗略判断,鲜有文献从汽车废弃量,新增保有量出发,对其展开系统性分析。

为加强对报废汽车中铂族金属的回收管理,本文从汽车报废量预测入手,采用物质流分析方法,估算从报废汽车的尾气净化催化剂中回收铂,钯,铑 3 种铂族金属的潜力,并从汽车生产者责任延伸制度的角度,提出铂族金属回收及循环利用体系建设的思路。

1 研究方法

1.1 汽车保有量预测

采用 Gompertz 模型预测 2018~2050 年中国汽车社会保有量.Gompertz 模型是常见的非线性拟合曲线之一,多用于预测因变量与自变量间的 S 型增长趋势.汽车作为耐用品,使用周期较长.随着收入水平的提升,汽车人均保有量呈现出加速增长,减速增长,饱和 3 个阶段,因此适合用 Gompertz 模型来模拟^[11-12].模型表达式如(1)所示,

$$v = \gamma e^{\alpha e^{\beta x}} \tag{1}$$

式中: v 表示汽车人均保有率,辆/人; x 表示地区人均 GDP,万元/人; γ, α, β 分别为模型待估参数,其中 γ 是 点,表示市场趋于饱和时的人均保有量水平; α 和 β 取值为负,用于刻画 S 型曲线的拐点位置和上升曲率。

以《中国统计年鉴》^[13]中 1996~2017 年人均 GDP,人口数据,中国汽车工业年鉴中 1996~2017 年民用汽车拥有量等数据为基础,利用 SPSS 工具进行 Gompertz 模型拟合,通过迭代找到最优解,非线性回归结果如表 1 所示.此时 点 γ 取值 0.464, α 取值 -4.211, β 取值-0.224, R^2 为 0.998,模型总体拟合效果较为理想。

表 1 汽车保有量 Gompertz 回归结果(γ 未设定)
Table 1 Regression results of car ownership under Gompertz model (γ is not set)

参数	估计值	95%置信区间		R^2
		下限	上限	
γ	0.464	0.334	0.593	0.998
α	-4.211	-4.397	-4.025	
β	-0.224	-0.258	-0.190	

如果采用工业化国家通用的 点 0.62^[14],非

线性回归结果如表 2 所示, R^2 为 0.998,模型总体拟合效果较为理想.这一 点水平最初用于西方 OECD 国家,被我国学者广泛采用^[12,15],有学者认为,受到人口密度,交通状况,城市化水平等状况的影响,有的国家即使人均收入水平较高,也达不到这个饱和水平^[11,16].此外,低收入国家通用的 点设定为 0.3~0.45^[16],就这一点来说,表 1 拟合的 点水平 0.464 比较合理.有文献据此将我国各省市的 点依据城市化率水平设定为 0.4~0.7^[11],或根据我国不同人群的收入水平设定为 0.4~0.6^[17]。

表 2 汽车保有量 Gompertz 回归结果($\gamma=0.62$)
Table 2 Regression results of car ownership under Gompertz model ($\gamma=0.62$)

参数	估计值	95%置信区间		R^2
		下限	上限	
α	-4.394	-4.491	-4.297	0.998
β	-0.194	-0.199	-0.189	

2000 年以前,Gompertz 模型拟合程度较差, 点未定的 Gompertz 模型略胜一筹;2001 年以来,两个模型的预测误差均在 5%以内,预测结果可靠.综合考虑我国人口密度,城市化水平等影响因素,采纳 点未定的 Gompertz 模型的拟合结果($\gamma=0.464$).基于此模型可预测到 2020 年,随着收入水平提高,我国人均保有量处于加速增长期,2020 年达到 0.21 辆/人;2021~2050 年,由于购买单位汽车的边际收益降低,再加上汽车作为耐用品的使用周期较长,因此汽车需求增速放缓,进入减速增长期,2050 年人均保有量达到 0.45 辆/人;2050 年以后,人均保有量达到饱和,收敛于 点 0.46 辆/人(图 1).与已有的运用 Gompertz 模型预测人均保有量的研究相比,赵红梅^[18]根据其他国家历史数据,将饱和水平设置为 0.32 辆/人,预测结果明显低于本文;Tian 等^[19]预测 2028 年进入减速增长期,2050 年进入饱和期,饱和水平接近 0.50 辆/人,与本文预测结果较为接近;Wang 等^[20]借鉴可比国家的保有量增速,认为保有量将以 13%~17%年增速迅速增长,预测结果与本文相比更为乐观。

运用 SPSS 时间序列预测功能,通过二次指数平滑法外推 2018~2050 年全国人口及人均 GDP.其中,Brown 线性趋势和 Holt 和线性趋势模型均适用

于具有线性趋势且没有季节性的序列,可以用于中短期社会经济发展预测.Brown 模型采用单一参数,二次平滑,对时间趋势序列平滑效果更好;Holt 模型采用双参数,一次平滑,灵活性较强.比较模型的 R^2 和 RMSE 后(表 3),选定 Brown 线性趋势模型,预测人口的 R^2 为 0.999,预测人均 GDP 的 R^2 为 0.997,拟合效果较好.得出预测结果后,再利用 Gompertz 模型可估计得出全国汽车保有量数据.

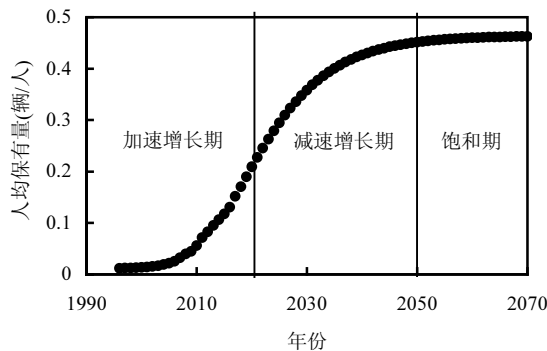


图 1 我国民用汽车人均预测保有量 S 形曲线
Fig.1 S-curve of car ownership per capita in China

表 3 2 个线性趋势模型参数比较

Table 3 Comparison between the parameters of two linear regression models

模型	人口		人均 GDP	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Brown	0.999	57.942	0.997	0.098
Holt	0.999	59.375	0.997	0.099

表 4 Gompertz 模型预测结果与误差

Table 4 Results of Gompertz model and error

年份	预测保有量(万辆)	预测误差(%)
2003	7528.69	-3.50
2004	9660.65	3.25
2005	11207.77	2.51
2006	12968.72	2.36
2007	14602.82	0.03
2008	16157.33	-0.78
2009	18103.35	-2.54
2010	21085.76	0.86
2011	7528.69	-3.50
2012	9660.65	3.25
2013	11207.77	2.51
2014	12968.72	2.36
2015	14602.82	0.03
2016	16157.33	-0.78
2017	18103.35	-2.54

从表 4 可看出,和实际保有量的历史数据相比,Gompertz 模型的预测误差均在 4%以内,预测结果可靠.

1.2 汽车报废量预测

根据社会保有量的变化和一定时间内的销售量可以进一步估算出该时间段内产品的理论报废量^[21-22].计算公式如下:

$$Q_t = S_t \Delta H \tag{2}$$

式中: Q_t 为第 t 年报废量; S_t 为第 t 年销售量; ΔH 为同期该类产品社会保有量的变化量, $\Delta H = H_t - H_{t-1}$.这种方法涉及参数少,估算过程简便,近年来在多种产品报废量预测中获得广泛应用^[22].由于新增量能够更好地反映汽车的“存量”变化(即新增量=销售量+进口量-出口量, $I_t = S_t + \text{Im}_t - \text{Ex}_t$),因此,本文用新增量代替销售量进行计算.其中, I_t 是第 t 年新增量, S_t 是第 t 年销售量, Im_t 是第 t 年进口量, Ex_t 是第 t 年出口量.另外,由于警车、军用车等组织的汽车保有量数据不可得,因此本文用民用汽车拥有量代替社会保有量进行估算,这可能会导致社会保有量的变化量 $\Delta H_{\text{household}}$ 偏小,从而导致报废量 Q_t 估算结果偏大.修正后的估算公式如下所示:

$$Q_t = I_t - \Delta H_{\text{household}} = (S_t + \text{Im}_t - \text{Ex}_t) - (H_t - H_{t-1}) \tag{3}$$

以《中国统计年鉴》^[13]中民用汽车拥有量和《中国汽车工业年鉴》^[23]中汽车销量、进口量、出口量为基础,代入式(3)中进行计算,得到我国 1996~2017 年汽车理论报废量,如表 5 所示.

比较新增量和理论报废量的变化规律,如图 2 所示,发现 1996 年新增量大致对应 2005 年报废量,1997 年新增量大致对应 2006 年报废量,新增量与报废量存在大约 9a 的对应关系.由此推测,我国汽车的报废高峰年限在 9a 左右.随着我国汽车新增量的不断增加,将会有越来越多的汽车进入报废年限,未来我国将迎来汽车的“报废潮”.

根据汽车报废高峰年限,采用市场供给 A 模型进一步估算 2018~2025 年的汽车报废量.市场供给 A 模型根据延迟分布的思想,假设产品按照一定比例围绕平均使用寿命渐次退出使用^[24].

$$Q_t = \sum S_i P_i (1 \leq i \leq n) \tag{4}$$

式中: Q_t 为第 t 年报废量; S_i 为 i 年前的汽车保有量新增量; P_i 为 i 年前生产的汽车在 t 年的废弃率; n 为产品最长使用寿命.废弃率 P_i 可以通过 Weibull 分

布获取,见式(5).由于汽车报废发生在较长时间内,并且存在高峰期,可以认为 Weibull 分布能够可靠地刻画其寿命密度分布^[25],具有建模合理,数据拟合性好,表达式处理方便等优势^[26],其密度函数和分布函数分别为:

$$P_i = F(T) - F(T - 1)$$

(5)

表 5 1996~2017 年我国汽车理论报废量估算
Table 5 Estimation of ELVs in China

年份	民用汽车拥有量 (万辆)	新增量 (万辆)	理论报废量 (万辆)
1996	1100.08	149.94	—
1997	1219.09	160.16	41.15
1998	1319.3	163.11	62.90
1999	1452.94	185.81	52.17
2000	1608.91	210.42	54.45
2001	1802.04	242.22	49.09
2002	2053.17	337.71	86.58
2003	2382.93	451.75	121.99
2004	2693.71	517.12	206.34
2005	3159.66	576.38	110.43
2006	3697.35	710.04	172.35
2007	4358.36	849.12	188.11
2008	5099.61	910.93	169.68
2009	6280.61	1389.07	208.07
2010	7801.83	1830.86	309.64
2011	9356.32	1869.39	314.90
2012	10933.09	1942.27	365.50
2013	12670.14	2222.21	485.16
2014	14598.11	2396.98	469.01
2015	16284.45	2494.41	808.07
2016	18574.54	2829.50	539.41
2017	20906.67	2906.20	574.07

注:数据来源《中国统计年鉴》^[13],《中国汽车工业年鉴》^[23].

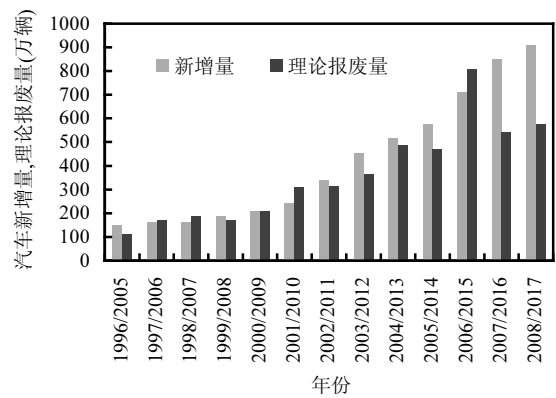


图 2 1996~2008 年新增量与 2005~2017 年理论报废量对比
Fig.2 Comparison between growth of car ownership (1996~2008) and estimation of ELVs (2005~2017)

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad (0 < T < T_{\max})$$

(6)

式中: β 为形状参数; η 为尺度参数,其计算方法如式

(7)、式(8)所示.其中 T_{average} 是汽车平均寿命,即 Weibull 分布函数的最大密度, T_{max} 则是 99% 的汽车报废时的年限^[27-28].通过分析前文得到的新增量和理论报废量可知,我国汽车的报废最高峰发生在第 9a,最长使用寿命为 15a,因此将 T_{average} 设定为 9a, T_{max} 设定为 15a.经计算, $\beta=3.623$,函数呈负偏态分布; $\eta=9.839$.

$$\left(\frac{T_{\text{average}}}{T_{\text{max}}}\right)^\beta = \frac{\beta - 1}{-\beta \ln 0.01}$$

(7)

$$\eta = T_{\text{average}} \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\beta}}$$

(8)

将各参数代入式(5)计算,得到废弃率 P_i 的寿命分布.进一步计算出 2018~2025 年全国汽车报废量.

基于各省人均 GDP 特征,估算各省汽车报废量的空间分布情况.由于报废量受人口,GDP 综合影响,而 Gompertz 模型定量描述了这一相关性,因此采用 Gompertz 模型预估的人均社会保有率为权重,来预测空间分布格局.预测思路如下:首先以 2018 年各省人口,人均 GDP 数据套用 Gompertz 模型得出各省的汽车人均保有率;再对所有省级人均保有率做归一化处理,使其总和为 1,从而得出报废量权重指数;最后按权重分配报废量.

1.3 铂族金属回收潜力及供需变化分析

基于上述汽车理论报废量的时空分布预测,采用物质流分析模型,计算报废汽车中的三元催化剂所含铂族金属的回收潜力时空分布.

回收潜力被定义为能够以精炼金属或被包含在可重复使用的零件中的形式返回到物质流,其特性在功能上能够再次被利用的内含元素的量^[10].根据前文预测出的各年汽车报废量和生产时单位汽车铂族金属用量为基础,预测我国 2018~2025 年铂族金属回收潜力.计算公式为:

$$R_t = \sum_{i=t-15}^{i=t-1} Q_i p_i$$

(9)

式中: R_t 表示第 t 年报废汽车三元催化剂中铂族金属的回收潜力; $t;Q_i$ 表示第 i 年生产的汽车在第 t 年报废的数量($t-15 \leq i \leq t-1$); p_i 表示第 i 年单位汽车铂族金属用量, t .单位汽车铂族金属用量则用某年我国汽车催化剂中铂族金属需求量与当年我国汽车产量的比值表示,如表 6 所示.其中,由于铂族金属当年单位汽车用量受科技进步等外部冲击影响大,时间趋

势外推时规律性较小,模型 R^2 不够理想.因此,2019~2024 年单位汽车铂族金属用量直接采用 2018 年单位汽车铂族金属用量.另外,由于缺少我国 2003~2013 年催化剂铑需求量数据,因此用全球催化剂铑需求量及全球汽车产量的比值进行替代.催化剂中铂族金属需求量来自庄信万丰公司(Johnson Matthey)2019 年发布的铂族金属市场预测报告^[29],国内汽车产量数据来自中经网统计数据库^[30],全球汽车产量数据来自世界汽车工业协会(OICA)^[31].

表 6 2003~2024 年我国单位汽车铂族金属用量
Table 6 Platinum group metals consumption per unit in China from 2003 to 2024

年份	单位汽车 用铂量(g/辆)	单位汽车 用钯量(g/辆)	单位汽车 用铑量(g/辆)
2003	0.43	0.63	0.31
2004	0.45	0.65	0.32
2005	0.65	0.93	0.35
2006	0.66	0.95	0.37
2007	0.61	1.14	0.37
2008	0.48	1.30	0.39
2009	0.19	1.54	0.39
2010	0.17	1.71	0.25
2011	0.18	1.95	0.28
2012	0.17	2.15	0.29
2013	0.17	2.12	0.28
2014	0.17	2.11	0.27
2015	0.17	2.10	0.27
2016	0.17	2.25	0.27
2017	0.17	2.34	0.27
2018	0.16	2.33	0.28
2019 [*]	0.16	2.33	0.28
2020 [*]	0.16	2.33	0.28
2021 [*]	0.16	2.33	0.28
2022 [*]	0.16	2.33	0.28
2023 [*]	0.16	2.33	0.28
2024 [*]	0.16	2.33	0.28

注:^{*}为估计值,数据来源庄信万丰《铂族金属市场预测报告》^[29],中经网统计数据库^[30],世界汽车工业协会(OICA)^[31].

进一步分析 2025 年汽车三元催化剂用量需求,假设 2 种情景:

情景 1:汽车三元催化技术保持稳定,单台汽车铂族金属用量水平不变,以 2018 年我国单位汽车铂族金属用量为基础,结合前文预测的我国汽车新增保有量,可计算出未来我国汽车三元催化剂铂族金属消耗量.计算公式为:

$$C = p \times \Delta H$$
 (10)

式中: C 表示铂族金属累计消耗量, p 表示单位汽车

铂族金属用量, ΔH 表示汽车新增保有量.单位汽车铂族金属用量则用 2018 年汽车催化剂中铂族金属需求量与 2018 年汽车产量的比值表示,如表 6 所示.催化剂中铂族金属需求量来自庄信万丰公司 2019 年发布的铂族金属市场预测报告^[29],汽车产量数据来自中国汽车工业协会行业信息部^[32].

情景 2:应对更严格的环保排放,增加三元催化剂中铂族金属用量.我国于 2020 年 7 月起施行的国六排放标准(GB 18352.6-2016)^[33],对汽车尾气中氮氧化物和颗粒物的限制更加严苛,因此对铂族金属的需求也更高.国六排放标准对标于欧盟 2017 年 9 月起实行的 Euro 6d 法规.根据相关研究对 Euro 6d 影响铂族金属用量的预测^[34],如表 7 所示,假设 2020 年起我国生产的轻型汽车催化剂达到欧盟单位汽车铂族金属用量,以此为目标进行需求预测.

表 7 情景 1 与情景 2 单位汽车铂族金属用量
Table 7 Comparison between Platinum group metals consumption per unit of scenario 1 and 2

基准	用铂量(g/辆)	用钯量(g/辆)	用铑量(g/辆)
情景 1	0.16	2.33	0.28
情景 2	3.01	3.88	0.30

注:数据来源庄信万丰《铂族金属市场预测报告》^[29],中国汽车工业协会行业信息部^[32].

2 结果与讨论

2.1 汽车保有量及报废量预测

通过 Gompertz 模型预测我国民用汽车 2018 年以后的社会保有量,结果如图 3 所示.至 2020 年加速增长期结束,全国民用汽车社会保有量将达到 29505.43 万辆.至 2025 年,全国民用汽车社会保有量比 2017 年翻一番,达到 42696.34 万辆;至 2030 年,全国民用汽车社会保有量达到 53243.72 万辆,至 2050 年减速增长期结束,全国民用汽车社会保有量达到 73757.52 万辆.因此,随着我国汽车保有量的攀升,很快会迎来汽车“报废潮”.

通过市场供给 A 模型预测我国 2018~2025 年汽车报废量,如图 4 所示.结果显示,近年来汽车报废量不断增长,2019 年高达 1502.75 万辆,然而,2019 年全国汽车实际回收数量仅为 195.1 万辆^[35],回收缺口巨大.到 2025 年,汽车报废量将达到 2401.64 万辆,是 2018 年的两倍有余,相关回收管理工作必须

加强建设.

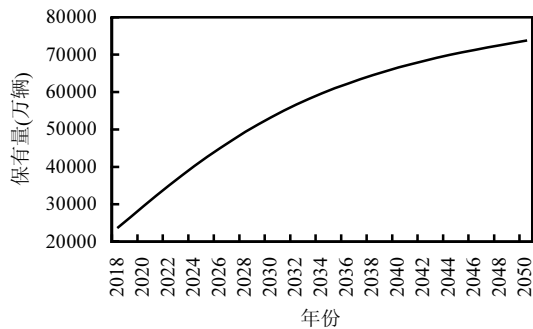


图3 我国民用汽车社会保有量预测
Fig.3 Estimation of car ownership in China

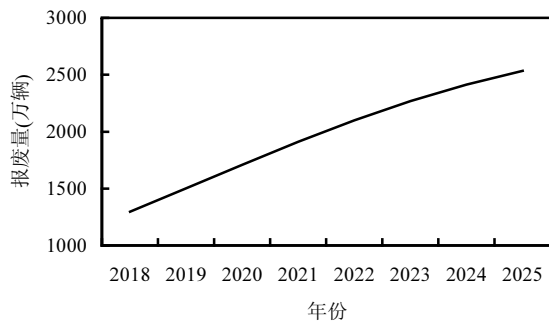


图4 我国民用汽车报废量预测
Fig.4 Estimation of ELVs in China

2.2 铂族金属回收潜力及时空分布

通过物质流分析,2018 年全球铂族金属供应与需求的物质流分析模型如图 5 所示.汽车尾气净化催化剂是全球铂族金属的最大需求,占比 62.47%;其

中,来自中国的需求量高达 77.00t,占全球需求的 19.59%.然而,全球汽车尾气净化催化剂中的铂族金属仅有 34.04%得到回收.

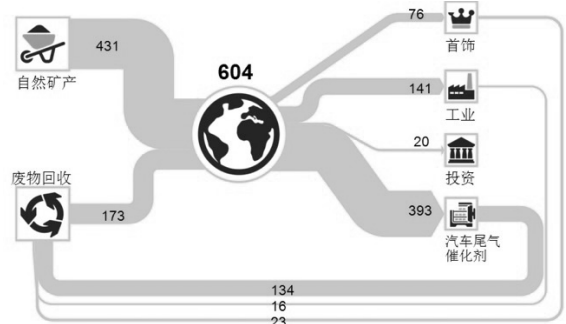


图5 全球2018年铂族金属物质流分析(t)
Fig.5 Material flow analysis of global platinum group metal in 2018 (t)

数据来源庄信万丰《铂族金属市场预测报告》^[29]

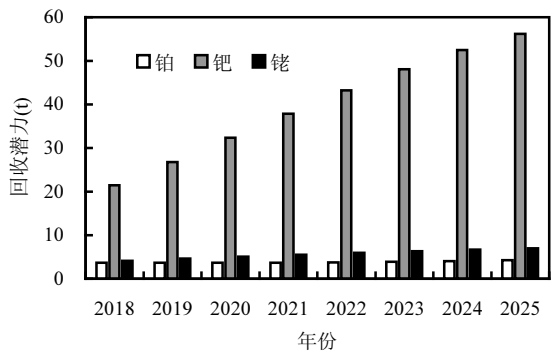


图6 2018~2025年报废汽车三元催化剂铂族金属回收潜力
Fig.6 Recycling potential of Platinum group metals in ELV from 2018 to 2025



图7 2025年我国各省报废量和报废汽车三元催化剂铂族金属回收潜力空间分布
Fig.7 Chinese regional distribution of ELVs and recycling potential of Platinum group metals in 2025

基于中国汽车报废量数据,计算得到全国 2018~2025 年报废汽车中废三元催化剂铂族金属回收潜力总体变化趋势,如图 6 所示。可以看出,钯的回收潜力增幅明显,到 2025 年高达 56.17t。这是因为,在汽车尾气的高温环境下,钯在保持催化剂系统热稳定性方面的表现优于铂;因此,为了应对越来越严格的排放法规,催化剂中的单位钯用量不断增加,在废弃汽车催化剂中积累了大量钯资源。铂和铑的回收潜力增幅较小,尤其是铂,二者到 2025 年分别达到 4.24 和 6.98t。这是因为,随着催化效率的提升和钯替代作用的迅速发展,铂和铑单位用量都有所降低(如表 6 所示),单位汽车用铂量自 2006 年不断下降,单位汽车用铑量自 2009 年也有所减少。

预估的 2025 年全国各省汽车报废量和铂族金属回收潜力空间分布如图 7 所示。由于报废量和铂族金属回收潜力的权重是根据各省人口和 GDP 进行分配,因此人口密度大,经济水平发达的省区,如京津地区和东南沿海各省的报废量和铂族金属回收潜力较大。

2.3 汽车催化剂行业铂族金属供需变化

汽车尾气催化剂中铂族元素消耗量的预测值,如图 8 所示。由于 2020 年起我国汽车保有量进入减速增长期,新增保有量开始减少,因此 3 种铂族金属在情景 1 下的消耗量均在 2019 年达到峰值,其中铂钯铑在 2019 年的峰值消耗量分别为 4.57,65.70,7.92t,此后消耗量不断减少。这说明按照当前催化剂消耗水平继续发展,汽车催化剂的铂族金属消耗水平比较平稳,不会造成大的供需矛盾。另外,随着铂族金属回收潜力的增加,2025 年铂、铑回收潜力超过其需求量,钯回收潜力也逼近其需求量,三元催化剂的铂族金属有望实现行业内闭环供应。

然而,情景 2 下我国从 2020 年起达到欧盟先进水平,因此我国汽车催化剂的铂族金属消耗量大幅度增加,如图 9 所示,铂、钯、铑分别在 2020 年达到峰值 85.01,109.38,8.37t。这说明按照情景 2 设定的欧盟 2018 年排放水平所需催化剂消耗量,这样能够提高汽车尾气处理水平,改善大气质量,但这一发展目标会提高我国铂族金属对外依存度。全球铂族金属供应量有限,2018 年铂钯铑产量分别为 190.1,217,23.5t^[29];另一方面,铂族金属的回收潜力也难以满足增加的需求,带来供需矛盾。

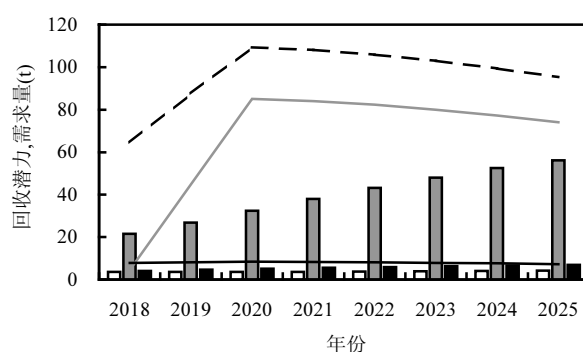


图 8 技术和环保要求不变时汽车三元催化剂铂族金属需求量

Fig.8 Demand on Platinum group metals for Three-way catalyst in cars under scenario 1

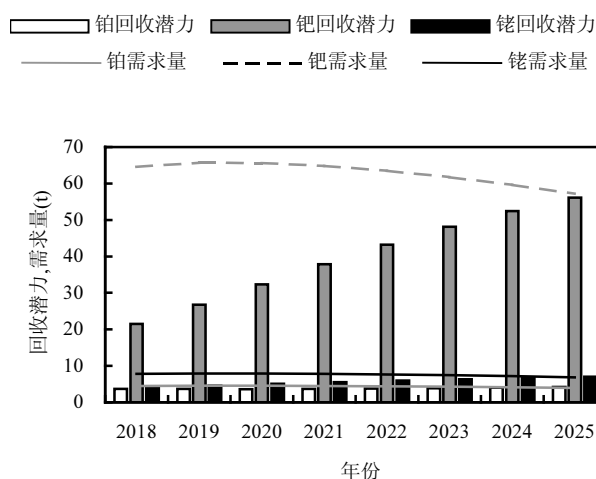


图 9 欧盟环保标准条件下汽车三元催化剂铂族金属需求量

Fig.9 Demand for Platinum group metals under scenario 2

图 9 欧盟环保标准条件下汽车三元催化剂铂族金属需求量

我国越来越严格的排放法规推动了汽车产业铂族金属需求的增长。轻型汽油车的 VOCs 排放因子随排放标准的提高显著降低^[36];提高排放标准的减排效果高于 20%^[37]。2020 年 7 月 1 日开始实施的国六标准,对尾气常规排放物的限值提高了 50%左右^[33]。排放限值的巨大变化无疑会影响尾气净化催化剂的装载率及其中的铂族金属含量。可以预见,国内汽车制造商为了符合国六标准,将会增加铂族金属的需求量。

另一方面,未来也存在铂族金属需求降低的可能性:(1)目前我国大力发展新能源汽车,出台多项政策刺激其发展。新能源汽车增量连续 2a 超过 100 万辆,增长迅猛。可以预见,未来新能源汽车的发展,会降低汽车产业对铂族金属的需求。(2)有欧洲汽车厂

商开始采用无铂族金属的选择性催化还原技术,以符合 Euro 6d 法规^[29]。但是,目前尚未出现足以替代三元催化剂的成熟技术。因此,未来很长一段时间内,汽车尾气净化对铂族金属的需求依然强劲。

2.4 讨论

考虑到部分车辆寿命年限内需更换尾气净化催化剂,测算结果可能会低估汽车报废量,铂族金属回收潜力和需求量。主流的三元催化剂的使用寿命一般为 8~10 万 km 运行里程,与汽车寿命保持一致;但倘若车主操作不当、保养不到位或使用了质量不佳的燃料,其寿命会大大缩短^[38]。也有文献认为其使用寿命为 5~8a^[39],车辆寿命年限内存在更换的可能性。因此,可参考已有文献,将更换率设置为 5%~8%^[4],汽车报废量,铂族金属回收潜力和需求量在此基础上有所增加。

考虑到我国新能源汽车发展势头良好,可将铂族金属回收潜力和需求量中来自新能源汽车的部分剔除:大部分新能源汽车不使用燃油,因此无需使用尾气净化催化剂;另一方面,燃料电池汽车。2019 年,我国新能源汽车保有量已经达到 381 万辆,其中纯电动汽车为 310 万辆^[1],占保有总量的 1.19%。因此,预测铂族金属回收潜力时,可按照 1%~2%的比例将其剔除。2025 年我国新能源汽车保有量预计达到 1169 万辆^[40],预计可达保有总量的 2.74%。可以预见,随着新能源汽车的发展,这一比例会逐渐增加。

考虑到我国和欧洲使用的汽车燃料的不同,情景 2 有可能高估了未来我国铂族金属的需求量。我国轻型汽车以汽油车为主,使用的尾气净化催化剂通常以钯为主(即单钯三效催化剂)^[5];与此相比,欧洲轻型汽车中柴油车更为普遍,对铂需求更高。实证数据印证了这一点:2018 年我国单位汽车用铂量(0.16g/辆)与用钯量(2.33g/辆)有很大差距;相比之下,欧洲单位汽车用铂量(3.01g/辆)与用钯量(3.88g/辆)差距并不显著。因此,情景 2 中假设 2020 年我国达到欧盟单位汽车用铂量,可能会使预测结果偏高。

2.5 建议

为了实现清洁尾气的目标,同时解决我国铂族金属的供需矛盾,应当积极推进从废三元催化剂中回收铂族金属。废催化剂中的铂族金属经富集后品位很高,不仅回收难度低,回收成本也低于原生金属,还可以减少污染消耗和环境污染^[3]。2018 年,全球汽

车尾气净化催化剂中的铂族金属仅有 34.04%得到回收。我国汽车工业对铂族金属的回收率远低于国际水平,报废汽车和废催化剂的回收管理工作开展得相对较晚,导致超过 60%报废汽车流向不规范回收个人或者企业^[4,41]。因此,应当大力发展生产者延伸责任制度,鼓励汽车生产企业缴纳处理基金,或建设逆向物流体系回收废旧汽车,提升正规回收率;同时,也应当积极完善废催化剂收集管理制度和回收体系,引导废催化剂流向正规处理企业,提高回收效率,有效控制再生利用过程中的环境污染。

3 结论

3.1 我国汽车工业三元催化剂中,钯的回收潜力增幅明显,到 2025 年高达 56.17t;铂和铑的回收潜力增幅较小,尤其是铂,二者到 2025 年分别达到 4.24 和 6.98t;从空间分布来看,京津地区和东南沿海各省的报废量和回收潜力比较大,是回收管理工作的重点区域。

3.2 对汽车行业铂族金属供需变化开展分析。如果按照当前催化剂消耗水平继续发展,铂族金属的需求量均在 2019 年达到峰值,随着铂族金属回收潜力的增加,三元催化剂的铂族金属有望实现行业内闭环供应,不会造成大的供需矛盾。如果按欧盟尾气处理水平,3 种铂族金属的需求量均在 2020 年达到峰值,由于全球铂族金属供应量有限,铂族金属的回收潜力也难以满足其需求量。

参考文献:

- [1] 公安部交通管理局.全国 66 个城市汽车保有量超过百万辆 私家车保有量首次突破 2 亿辆 [EB/OL]. <https://www.mps.gov.cn/n2254098/n4904352/c6852435/content.html>, 2020-02-10.
Ministry of Public Security and Traffic Administration. Car ownership in 66 cities across the country exceeded 1 million and private car ownership of the whole country exceeded 200 million for the first time [EB/OL]. <https://www.mps.gov.cn/n2254098/n4904352/c6852435/content.html>, 2020-02-10.
- [2] 李鹏远,周平,齐亚彬,等.中国主要铂族金属供需预测及对策建议[J].地质通报,2017,36(4):188-195.
Li P Y, Zhou P, Qi Y B, et al. Forecasts of supply and demand for major platinum group metals in China and corresponding suggestions [J]. Geological Bulletin of China, 2017,36(4):188-195.
- [3] 黄启飞,王菲,于泓锦,等.废汽车三元催化剂回收利用研究[J].环境保护,2018,46(16):17-21.
Huang Q F, Wang F, Yu H J, et al. Research on environmental management of the recycling of waste three-way catalyst [J].

- Environmental Protection, 2018,46(16):17-21.
- [4] 沈传松,张 巍,杨 骥,等.废汽车尾气三元催化剂的回收利用研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2015,37(4):78-83.
- Shen C S, Zhang W, Yang J, et al. Review of the recycling of spent automotive three-way catalysts [J]. Environmental Pollution & Control, 2015,37(4):78-83.
- [5] 张若然,陈其慎,柳群义,等.全球主要铂族金属需求预测及供需形势分析 [J]. 资源科学, 2015,37(5):1018-1029.
- Zhang R R, Chen Q S, Liu Q Y, et al. World demand and analysis of supply and demand of platinum-group metals [J]. Resources Science, 2015,37(5):1018-1029.
- [6] 雪 晶,胡山鹰,杨 倩.中国废旧汽车再生资源潜力分析 [J]. 中国人口.资源与环境, 2013,23(2):169-176.
- Xue J, Hu S Y, Yang Q. Potentials of the renewable resource of scrapped cars in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2013,23(2):169-176.
- [7] 黄宁宁.中国汽车行业钢铁动态物质流代谢研究 [D]. 北京:清华大学, 2012.
- Huang N N. China automobile industry iron and steel dynamic material flow metabolism research [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [8] 黄宁宁,陈定江,王 韬,等.中国汽车行业钢铁物质流代谢研究 [J]. 环境科学与技术, 2013,36(2):179-183.
- Huang N N, Chen D J, Wang T, et al. Iron and steel material flow metabolism in China automobile industry [J]. Environmental Science & Technology, 2013,36(2):179-183.
- [9] Andersson M, Söderman M L, Sandén B A. Are scarce metals in cars functionally recycled? [J]. Waste management, 2017,60:407-416.
- [10] Xu G, Yano J, Sakai S. Recycling potentials of precious metals from end-of-life vehicle parts by selective dismantling [J]. Environmental Science & Technology, 2019,53(2):733-742.
- [11] 古继宝,元芳芳,吴剑琳.基于 Gompertz 模型的中国民用汽车保有量预测 [J]. 技术经济, 2010,29(1):57-62.
- Gu J B, Qi F F, Wu J L. Forecasting on China's civil automobile-owned based on Gompertz model [J]. Technology Economics, 2010, 29(1):57-62.
- [12] 王旖旎.中国汽车需求预测:基于 Gompertz 模型的分析 [J]. 财经问题研究, 2005,27(11):43-50.
- Wang Y N. Car ownership forecast in China: an analysis based on Gompertz equation [J]. Research on Financial and Economic Issues, 2005,27(11):43-50.
- [13] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 1997,1998,1999,2000,2001,2002,2003,2004,2005,2006,2007,2008, 2009,2010,2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017.
- Statistics Bureau of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 1997,1998, 1999,2000,2001,2002,2003,2004,2005,2006,2007,2008,2009,2010,2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017.
- [14] Dargay J, Gately D. Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960-2015 [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1999,33(2):101-138.
- [15] 郝宏勋,杨沿平,陈铁嵩.中国近阶段汽车报废量,新增量和保有量预测研究 [J]. 公路与汽运, 2014,30(1):30-34.
- Xi H X, Yang Y P, Chen Y S. Estimation on car waste, changes and ownership in China [J]. Highways & Automotive Applications, 2014, 30(1):30-34.
- [16] Button K, Ngoe N, Hine J. Modelling vehicle ownership and use in low income countries [J]. Journal of Transport Economics and Policy, 1993,27(1):51-67.
- [17] 鲍叶静.我国城镇居民汽车拥有率组合预测——基于收入等级 [J]. 技术经济, 2011,30(3):87-90.
- Bao Y J. Study on assessment of economic benefit of industry: based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Technology Economics, 2011,30(3):87-90.
- [18] 赵红梅.基于 Gompertz 曲线模型之上的中国千人汽车保有量中长期预测 [J]. 工业技术经济, 2012,7(7):23.
- Zhao H M. The medium and long term forecast of China's vehicle stock per 1000person based on the Gompertz model [J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2012,7(7):23.
- [19] Tian W, Zhao H M, Ou X M. Vehicle ownership analysis based on GDP per capita in China: 1963~2050 [J]. Sustainability, 2014,6(8): 4877-4899.
- [20] Wang Y S, Teter J, Sperling D. China's soaring vehicle population: even greater than forecasted? [J]. Energy Policy, 2011,39(6):3296-3306.
- [21] 何逸林,廖小红,田 晖.我国家用电器理论报废量测算方法研究及结果分析 [J]. 家电科技, 2010,30(10):76-77.
- He Y L, Liao X H, Tian H. Study on theoretical measurements for end-of-life household appliances in China and analysis of the results [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2010,30(10):76-77.
- [22] 黄慧婷,童 昕,蔡 毅,等.电器电子产品废弃量估算方法再评估 [J]. 生态经济, 2019,35(11):36.
- Huang H T, Tong X, Cai Y, et al. Re-examination on estimation methods for WEEE generation in China [J]. Ecological Economy, 2019,35(11):36.
- [23] 中国汽车技术研究中心.中国汽车工业年鉴 [M]. 北京:机械工业出版社, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017.
- China Automotive Technology & Research Center. China Automotive Industry Yearbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017.
- [24] 刘志峰,薛雅琼,黄海鸿.我国大陆地区电器电子产品报废量预测研究 [J]. 环境科学学报, 2016,36(5):1875-1882.
- Liu Z F, Xue Y Q, Huang H H. Prediction of the quantities of waste electric and electronic products in Mainland China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,36(5):1875-1882.
- [25] Kuong I H, Li J, Zhang J, et al. Estimating the evolution of urban mining resources in Hong Kong, up to the Year 2050 [J]. Environmental Science & Technology, 2019,53(3):1394-1403.
- [26] 王亚菲,邬海峰.基于威布尔分布的汽车寿命估计方法 [J]. 江南大学学报(自然科学版), 2015,30(2):248-252.
- Wang Y F, Wu H F. Weibull distribution parameters estimation for the automobile life [J]. Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition), 2015,30(2):248-252.
- [27] Provazi K, Campos B A, Espinosa D C R, et al. Metal separation from

- mixed types of batteries using selective precipitation and liquid-liquid extraction techniques [J]. *Waste Management*, 2011,31(1):59-64.
- [28] Song X, Hu S, Chen D, et al. Estimation of waste battery generation and analysis of the waste battery recycling system in China [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017,21(1):57-69.
- [29] 庄信万丰. 2019 年 5 月铂族金属市场报告 [EB/OL]. <http://www.platinum.matthey.com/documents/new-item/pgm%20market%20reports/pgm-market-report-may-2019-cn.pdf>, 2019-10-20.
- Johnson Matthey. PGM market report May 2019 [EB/OL]. <http://www.platinum.matthey.com/documents/new-item/pgm%20market%20reports/pgm-market-report-may-2019-cn.pdf>, 2019-10-20.
- [30] 中经网统计数据库.全国宏观年度库 [EB/OL]. <http://zhongjing.lib.pku.edu.cn>, 2019-12-15.
- CEInet statistics database. National macro annual database [EB/OL]. <http://zhongjing.lib.pku.edu.cn>, 2019-12-15.
- [31] International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. Production Statistics [EB/OL]. <http://www.oica.net/category/production-statistics>, 2019-12-15.
- [32] 中国汽车工业协会行业信息部.2018 年 12 月汽车工业产销情况简析 [EB/OL]. http://www.caam.org.cn/chn/4/cate_31/con_5221206.html, 2019-10-20.
- China Association of Automobile Manufacturers. Analysis on automobile industry production and sales, December 2018 [EB/OL]. http://www.caam.org.cn/chn/4/cate_31/con_5221206.html, 2019-10-20.
- [33] GB18352.6—2016 生态环境部.轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段) [S].
- GB18352.6—2016 National pollutant emission standard, light vehicle pollutant emission limits and measurement methods (6th phase) [S].
- [34] 包 顿,程天泽.铂族金属供需及市场价格展望 [J]. *贵金属*, 2018, 39(2): 81-86.
- Bao D, Cheng T Z. Supply-demand analysis and market outlook for platinum group metals [J]. *Precious Metals*, 2018,39(2):81-86.
- [35] 商务部市场体系建设司.2019 年全国报废机动车回收情况 [EB/OL]. <http://scjss.mofcom.gov.cn/article/bz/bzsj/202001/20200102929646.shtml>, 2020-1-18.
- Department of Market System Development, Ministry of Commerce. Recovery of end-of-life vehicles in China [EB/OL]. <http://scjss.mofcom.gov.cn/article/bz/bzsj/202001/20200102929646.shtml>, 2020-1-18.
- [36] 姚 森,魏 巍,程水源,等.轻型汽油车 VOCs 排放特征及其大气反应活性 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(10):2923-2929.
- Yao S, Wei W, Cheng S Y, et al. Emission characteristics and chemical reactivity of volatile organic compounds from light-duty gasoline vehicles [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(10):2923-2929.
- [37] 王慧慧,曾维华,吴开亚.上海市机动车尾气排放协同控制效应研究 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(5):1345-1352.
- Wang H H, Zeng W H, Wu K Y. Co-control effects of motor vehicle pollutant emission in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(5):1345-1352.
- [38] 祝 杨.汽车三元催化器堵塞状况评估方法研究 [D]. 长春:吉林大学, 2016.
- Zhu Y. Research on assessment of the blocking condition in the three-way catalytic converter [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [39] 李庆钢.如何延长三元催化转换器的使用寿命 [J]. *汽车运用*, 2005,26(1):42-43.
- Li Q G. How to extend the lifetime of three-way catalytic converter [J]. *Auto Application*, 2005,26(1):42-43.
- [40] 工业和信息化部装备工业司.对《新能源汽车产业发展规划(2021~2035 年)》(征求意见稿)公开征求意见 [EB/Z]. <http://www.miit.gov.cn/n1278117/n1648113/c7553623/content.html>, 2020-2-10.
- Department of Equipment Industry, Ministry of Industry and Information Technology. Development plan of new energy vehicle industry (2021~2035) (Draft for comments) [EB/Z]. <http://www.miit.gov.cn/n1278117/n1648113/c7553623/content.html>, 2020-2-10.
- [41] 王永录.废汽车催化剂中铂族金属的回收利用 [J]. *贵金属*, 2010, 031(4):55-63.
- Wang Y L. Recovery and Utilization of Platinum Group Metals from Waste Auto Catalysts [J]. *Precious Metals*, 2010,031(4):55-63.

作者简介: 张安迎(1995-),女,河南安阳人,北京大学硕士研究生,主要从事产业地域与产业生态学研究.发表论文 1 篇.