

老旧机动车淘汰更新及补贴政策的成本有效性分析 ——以北京市为例

于亚申 胡煜晗 张世秋[†]

北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; [†] 通信作者, E-mail: zhangshq@pku.edu.cn

摘要 以氮氧化物和 PM_{2.5} 削减量为减排效果评估指标, 以车辆残值成本、政策执行成本、燃油成本节约为社会成本指标, 借助单位减排产生的社会成本(社会成本/减排量比值), 对北京市 2011 年 6 月至 2020 年 12 月老旧机动车淘汰更新及补贴政策的实施效果进行成本有效性分析。结果表明, 研究覆盖期内, 该政策的成本有效性并非单调递减, 而是呈现阶段性和结构性特点: 在重点淘汰柴油货车时期, 政策成本有效性最佳, 在重点淘汰国 III 汽油车时期, 成本有效性较差, 两者氮氧化物及 PM_{2.5} 单位污染物减排成本分别相差 14 倍和 34 倍; 随着车型拓展到更高排放标准, 淘汰小型客车的成本有效性呈下降趋势, 国 III 和国 IV 排放标准的小型客车减排潜力已较为有限, 且成本有效性远低于政策早期; 淘汰重型货车的成本有效性较高, 且在部分时期存在社会成本的节约。建议后续相关政策的制定应基于成本有效性, 审慎地将排放标准更高的小型客车纳入该政策管制范围, 应更关注重型柴油货车加速淘汰的政策设计优化。

关键词 PM_{2.5}; 氮氧化物; 老旧机动车; 成本有效性分析

A Case Study on Cost-effectiveness of Accelerated Vehicle Retirement Programs in Beijing

YU Yashen, HU Yuhan, ZHANG Shiqiu[†]

College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871;

[†] Corresponding author, E-mail: zhangshq@pku.edu.cn

Abstract NO_x and PM_{2.5} reduction were taken as indicators of emission reduction effect, and vehicle residual value cost, policy implementation cost and fuel cost saving were taken as social cost indicators. Based on social cost of per unit emission reduction (the ratio of social cost to emission reduction), cost-effectiveness analysis was conducted on the effect of the old motor vehicle replacement and subsidy policy in Beijing from June 2011 to December 2020. The results show that the cost-effectiveness of the policy is not monotonically decreasing over the period covered by the study. It shows phased and structural characteristics: the policy is most cost-effective in phasing out diesel trucks and least cost-effective in phasing out China III gasoline vehicles, and the cost of reducing per unit of NO_x and PM_{2.5} differs by 14 times and 34 times, respectively; the cost-effectiveness of phasing out small buses tends to decline with the expansion of models to higher emission standards, and the emission reduction potential of small buses with China III and China IV Emission Standards has been limited and the cost-effectiveness is much lower than that under the early policy; the cost-effectiveness of phasing out heavy trucks is better and there are social cost savings in some periods. The paper suggests that the formulation of relevant follow-up policies should be based on cost-effectiveness. It should be cautious about including small passenger cars with higher emission standards in policy implementation, and focus more on the optimization of the policy design for accelerated phase-out of heavy diesel trucks.

Key words PM_{2.5}; NO_x; old motor vehicles; cost-effectiveness analysis

20世纪90年代以来,中国机动车数量由1990年的500万辆迅速增长至2020年的3.72亿辆^[1],道路移动源逐步成为我国重要的大气污染源之一^[2]。为控制交通部门空气污染排放,中央及地方政府陆续出台包括排放标准升级、限行限购和发展新能源汽车等在内的多项机动车排放控制政策。其中,2008年以来推出的老旧机动车^①淘汰更新及补贴政策(简称补贴淘汰政策)则针对老旧机动车的高排放特点,通过补贴激励高排放车辆的加速淘汰和更新替代,在机动车保有量不变的情况下,降低车队整体的污染物排放水平。在政策实施的早期阶段,由于高排放车辆总量少但所占排放比例大,该政策具有针对性强、推行阻力小和政策短期效果显著的特点,能够在机动车污染物排放贡献较大的背景下,以较低的社会成本实现一定程度的污染物减排。该政策被国内31个省份采用和推广,各省份补贴淘汰规模由几十万辆到数百万辆不等。然而,随着政策持续实施,与政策初期相比,机动车市场规模和车队结构等均已发生变化,补贴淘汰政策涉及的车辆由原来的国I前、国I标准逐步拓展到更高排放标准车型的车型,单车减排效果以及减排的成本有效性也在发生相应的变化。由于缺乏对政策持续实施的实证评估分析,难以明晰该政策继续实施的必要性和经济合理性。因此,有必要针对老旧机动车补贴淘汰政策的实施效果,特别是减排效果和社会成本进行回溯性的评估,并分析政策实施成本有效性的动态变化,为该政策是否需要调整以及如何调整提供参考。

国际上对老旧机动车补贴淘汰政策的研究可追溯至20世纪90年代,早期主要关注补贴标准、最优补贴金额和最佳车辆更新时间等具体政策优化手段^[3-4]。近期的研究更多地关注政策影响评估,认为该政策的实施能够在一定程度上提高车队的燃油经济性、促进污染减排,并提高新车销售量^[5-7]。也有一些研究从政府成本视角对该政策早期的实施效果进行评估^[8-9]。然而,这些研究大多基于某一时点进行政策评估,且较多地关注政策实施的政府财政支出成本,较少关注政策可能引致的公众福利变化和能源成本,以及政策效果及其社会成本的动态变化。实际上,补贴激励措施下提前报废带来的

车辆残值成本和新旧车队置换带来的燃油消耗量及成本变化往往由公众承担,尤其在淘汰车队规模较大的情况下,这一公众福利变化不容忽视。因此,本文从全社会视角,对老旧机动车补贴淘汰政策的减排效果和相应的社会成本进行更全面的核算,在现有车队和市场规模、车辆排放标准等背景下,借助单位减排量所发生的社会成本(即社会成本/减排量比值),对该政策的成本有效性进行评估,并结合各政策实施阶段、不同淘汰对象的成本有效性差异,对老旧机动车补贴淘汰政策持续实施以来成本有效性的时间变化趋势进行动态观测和比较,旨在为政策的制定和完善提供信息和科学支持。

作为全国最早且持续实施补贴淘汰政策时间最长的重点城市,北京市在十三年来的政策实践中积累了丰富的经验和数据,为在长时段内进行政策成本有效性的变化趋势观测提供了可能性。同时,北京市机动车保有量居全国首位,车型结构较为丰富,其老旧机动车淘汰更新数据具有一定的代表性。因此,本文选择北京市进行重点案例研究。

1 研究方法

1.1 政策背景

2008—2021年期间,北京市先后实施六轮老旧机动车补贴淘汰政策(表1),重点淘汰车型由早期的黄标车(即未达到国I排放标准的汽油车或未达到国III排放标准的柴油车)拓展至国III排放标准汽油载客汽车和汽油载货汽车。基于数据可得性,本文主要针对后3个阶段(重点淘汰国I和国II小型客车阶段、重点淘汰国III柴油货车阶段以及重点淘汰国III汽油车阶段)进行研究。

据北京市绿色交易所统计数据,2011年6月至2020年12月期间,北京市共淘汰机动车130.3万辆,包括国I前至国IV排放标准的微型、小型、中型、大型客车及轻型、中型、重型货车车型。其中小型客车110.9万辆,占淘汰总量的85%;重型货车4.4万辆,占比3.4%(图1)。

1.2 测算和分析方法

本文采用成本有效性分析的研究框架,测算政策持续实施带来的减排量与社会成本,从而测算政策成本有效性的时间变化。

^① 指登记注册6年及以上的国I前、国I、国II、国III和国IV排放标准的载客汽车、载货汽车和专项作业车(不含出租汽车、摩托车和低速载货汽车)。

表 1 北京市老旧机动车淘汰政策重点淘汰车型

Table 1 List of key retired models under accelerated vehicle retirement program in Beijing

实施时间	重点淘汰车型	实施阶段
2008年9月—2010年5月	黄标车(未达到国I排放标准的汽油车,或未达到国III排放标准的柴油车)	重点淘汰黄标车阶段
2011年8月—2012年12月	国I和国II的私人小客车及重型柴油车	
2013年1月—2014年12月	国I和国II的私人小客车及重型柴油车	重点淘汰国I和国II小型客车阶段
2015年1月—2016年12月	国I和国II的私人小客车及重型柴油车	
2017年9月—2019年9月	国III及以前的柴油货运车(不含黄标车)	重点淘汰国III柴油货车阶段
2020年4月—2021年12月	国III排放标准汽油载客汽车和汽油载货汽车	重点淘汰国III汽油车阶段

说明:重点淘汰车型指在当前政策时期进行重点补贴激励以加速淘汰的主要车型。

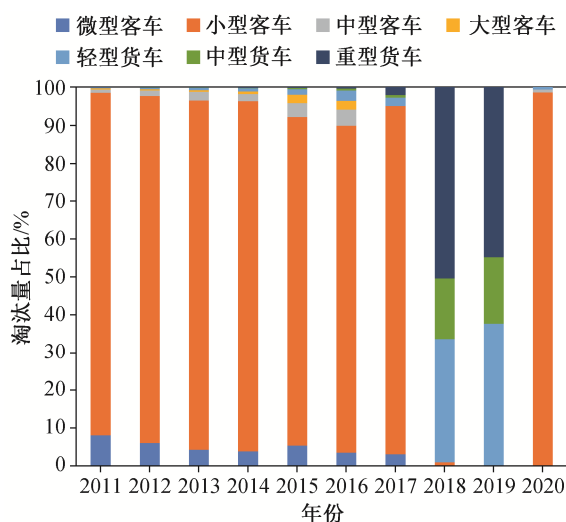


图 1 2011—2020 年北京市淘汰车队结构

Fig. 1 Structure of retired vehicle fleet in Beijing during 2011–2020

由于移动源污染物排放对臭氧污染和PM_{2.5}污染的贡献占比不断提升^[10],本文把作为臭氧前体物的氮氧化物和一次PM_{2.5}的减排量作为评估减排量的表征指标。

在Zhou等^[9]和Xiao等^[11]的研究中,对政策成本的评估主要从政府财政支出视角,侧重使用补贴资金表征政策成本,但这只是一项政策实施的直接

政府成本支出,忽略了车辆提前淘汰造成的车辆残值损失及因车队替换带来的燃油成本节约。本文关注的是政策实施引起的社会成本变化,因此,选取车辆残值成本、政策执行成本和燃油成本节约作为政策成本指标。

本文采用社会成本/减排量比值(即实现单位减排量所带来的社会成本)来表征政策成本有效性变化。社会成本/减排量比值越高,成本有效性越差;比值越低,成本有效性越佳。本文涉及的评估指标及表征方式见表2。

1.2.1 污染物减排量

鉴于本研究所涉及时段北京市存在其他机动车数量调控措施,淘汰车辆配置指标需在短期内购置新车方可保留,故在本文的测算中假设因政策淘汰的车队将在淘汰年份替换为符合当年国家排放标准要求的置换车队,替换前后车队中车辆总量保持不变。本文假设补贴淘汰政策不引起除车辆更新替代之外的其他变动,因此,本文的污染物减排量指的是因实施补贴淘汰政策,新旧车队替换带来的污染物排放量的变化。

本文参考《道路车辆空气污染物排放清单技术指南(试行)》^[12]和《城市机动车排放空气污染物的测算方法》^[13],测算政策实施带来的污染物年排放

表 2 成本有效性分析指标及阐释

Table 2 Cost-effectiveness analysis indices and interpretation

分类	指标	含义
减排量	NO _x 减排量	新旧车队替换带来的氮氧化物减排量
	PM _{2.5} 减排量	新旧车队替换带来的一次PM _{2.5} 减排量
社会成本	车辆残值成本	提前淘汰车队剩余期望使用价值的损失
	政策执行成本	保障政策有效实施的政府财务支出
	燃油成本节约	因车队燃油经济性提升带来的燃油成本节约
社会成本/减排量	NO _x 社会成本/减排量比值	单位氮氧化物减排所需的成本
	PM _{2.5} 社会成本/减排量比值	单位一次PM _{2.5} 减排所需的成本

量变化。首先,分别测算淘汰车队的排放因子和置换车队*y*年*i*车型*j*类污染物的排放因子。在此基础上,测算*y*年*i*车型*j*类污染物的年排放因子差异值,即新旧车辆置换后行驶单位里程对应的污染物减排量,并测算整个车队*y*年*j*类污染物减排量(Emission_{*j,y*},吨)。测算公式如下:

$$\Delta EF_{i,j,y} = EF_{i,j,y}(\text{old}) - EF_{i,j,y}(\text{alt}), \quad (1)$$

$$\text{Emission}_{j,y} = \sum_{i,j} Q_{i,y} \times \Delta EF_{i,j,y} \times \text{VKT}_{i,y} \times \text{years} \times 10^{-6}, \quad (2)$$

其中,*i*表示机动车辆类型,*j*表示污染物类型,*y*表示年份;EF_{*i,j,y*}(old)表示*y*年*i*车型淘汰车队*j*类污染物的排放因子(g/km);EF_{*i,j,y*}(alt)表示*y*年*i*车型置换车队*j*类污染物的排放因子(g/km);ΔEF_{*i,j,y*}表示*y*年*i*车型淘汰前后*j*类污染物的年排放因子差异值(g/km);Q_{*i,y*}表示*i*车型*y*年的报废数量(辆);VKT_{*i,y*}表示*i*车型在*y*年的车队平均年行驶里程(km/辆);years为提前淘汰年数(年)。*j*类污染物的总减排量(Emission_{*j*},吨)可表示为该类污染物*y*年排放量的加总:

$$\text{Emission}_j = \sum_y \text{Emission}_{j,y}. \quad (3)$$

淘汰数量数据来自北京市补贴淘汰政策的执行机构——北京绿色交易所(原北京环境交易所)。排放因子数据取自《道路车辆空气污染物排放清单技术指南(试行)》^[12],该数据在此前的研究中被广泛采用。北京市区域内的年行驶里程中,客车部分数据取自《北京交通发展年度报告》^[14],由于2017年的小型、中型客车里程数据存在缺失,此处使用插值法予以补充;货车部分行驶里程数据参考2019年西安交通大学研究数据^[15];提前淘汰年数由理论车龄上限与实际平均淘汰车龄相减得到。

1.2.2 社会成本

1) 车辆残值成本。指提前淘汰车队剩余期望使用价值的损失。本文使用重置成本法,对车辆残值成本(RV_{*y*},元)进行测算,通过实际二手车交易的平均价格来测算提前淘汰车辆的残值成本。由于车辆残值成本与财政补贴支出之间存在一些重复计算,因此从社会成本计算的角度,车辆残值成本中

扣除了财政补贴支出部分。计算公式为

$$RV_y = \frac{\sum_{i,k} (Q_{i,k,y} \times V_{i,k} - \text{Subsidy}_{i,k,y})}{\text{Deflater}_y}, \quad (4)$$

其中,*k*表示使用车龄(年),Q_{*i,k,y*}表示*y*年份*k*车龄*i*车型的淘汰数量(辆),V_{*i,k*}表示*k*车龄*i*车型的车队历史交易平均价格(元/辆),Subsidy_{*i,k,y*}表示*y*年份*k*车龄*i*车型的财政补贴支出(元/辆),Deflater_{*y*}表示*y*年GDP平减指数(%)。

车队历史交易平均价格数据取自二手车交易平台^①,补贴金额数据来自北京绿色交易所,GDP平减指数数据取自北京市统计局。

2) 政策执行成本。本文将政策执行过程中产生的政府财政支出作为政策执行成本,包含执行机构设立带来的补贴财政支出、人员工资开支和第三方平台运营费用等成本。第*y*年政策执行成本(Gov_{*y*},元)的测算方法为

$$\text{Gov}_y = \frac{\text{Employ}_y + \text{Operation}_y + \sum_{i,k} \text{Subsidy}_{i,k,y}}{\text{Deflater}_y}, \quad (5)$$

其中,Employ_{*y*}表示第*y*年的员工工资水平(元),Operation_{*y*}表示第三方平台的*y*年的运营成本(元)。

基础数据部分参考Xiao等^[11]对北京市生态环境局、北京市交通管理局和北京市财政局等机构的调研数据^②。工资水平数据取自国家统计局^[16],并参考《经济评估指南》^[17]提供的方法测算人力成本的影子价格。GDP平减指数(Deflater_{*y*})基于国家统计局^[16]数据测算。

3) 燃油成本节约。新旧车辆置换之后,车队燃油经济性会有所提升,进而产生燃油成本节约。燃油成本节约根据车辆年度油耗水平差异、车队结构变化、年行驶里程以及单位油料价格等信息计算得到。

首先,计算*y*年*i*车型新旧车队的年百公里油耗水平差异(L/100 km),即某类车辆替换前后行驶百公里油耗水平的年度差异量:

$$\Delta \text{FCP}_{i,y} = \text{FCP}_{i,y}(\text{old}) - \text{FCP}_{i,y}(\text{alt}), \quad (6)$$

其中,FCP_{*i,y*}(old)表示*y*年*i*车型被淘汰车队的平均

① 本文使用Python中Beautiful Soap工具包采集并清洗来自4个主流二手车交易平台(瓜子二手车、二手车之家、商用车网和卡车之家)的40076条交易数据,进而测算不同车型、不同车龄的车队历史平均交易价格。

② 根据Xiao等^[11]的研究,共有180名工作人员参与政策的执行实施工作。其中,大约有50名工作人员负责北京市环保局内的旧车淘汰的政策统筹工作,30名工作人员负责监督车辆的报废拆解工作,40名工作人员负责车辆的注销工作,60位工作人员在报废车辆的第三方管理服务平台和营业网点工作。每年对营业网点和第三方平台的年运营成本投入约为500万元。

百公里油耗水平(L/100 km), $FCP_{i,y}(\text{alt})$ 表示 y 年 i 车型置换车队的平均百公里油耗水平(L/100 km)。

然后, 利用式(7), 测算 y 年的年燃油成本节约(Fuel _{y} , 元):

$$\text{Fuel}_y = \frac{\sum_i (Q_{i,y} \times \text{VKT}_{i,y} \times \Delta \text{FCP}_{i,y} \times P_{i,y}) \times 10^{-2}}{\text{Deflater}_y}, \quad (7)$$

其中, $P_{i,y}$ 表示 y 年 i 型车辆使用的汽柴油去除税费后的价格(元/L)。

百公里油耗(FCP)数据基于全国平均工况油耗^[18]和能源与交通创新中心研究成果^[19]测算; P_i 是汽柴油的影子价格, 本文在北京市汽柴油历史价格数据基础上去除税费^[20]予以表征。

4) 总社会成本。本文将总社会成本界定为实施该政策带来的相关增量成本变化, 包括车辆提前淘汰带来的车辆残值成本、政策执行成本及燃油成本节约。第 y 年成本(Cost _{y} , 万元)及各年总成本之和(Cost, 万元)计算公式为

$$\text{Cost}_y = \text{Gov}_y + \text{RV}_y - \text{Fuel}_y, \quad (8)$$

$$\text{Cost} = \sum_y (\text{Gov}_y + \text{RV}_y - \text{Fuel}_y). \quad (9)$$

1.2.3 社会成本/减排量比值计算

本文将单位减排所需要耗费的成本作为衡量成本有效性的指标。 j 类污染物 y 年的社会成本/减排量比值(CER _{j,y} , 万元/吨)可表示为

$$\text{CER}_{j,y} = \frac{\text{Gov}_y + \text{RV}_y - \text{Fuel}_y}{\sum_{i,j} Q_{i,y} \times \Delta \text{EF}_{i,j,y} \times \text{VKT}_{i,y} \times \text{years} \times 10^{-6}}, \quad (10)$$

j 类污染物总社会成本/减排量比值(CER _{j} , 万元/吨)可表示为

$$\text{CER}_j = \frac{\sum_y (\text{Gov}_y + \text{RV}_y - \text{Fuel}_y)}{\sum_y \text{Emission}_{j,y}}. \quad (11)$$

2 测算结果

基于上述成本有效性分析框架测算, 研究期内北京市因实施补贴淘汰政策累计减少 17.6 万吨氮氧化物以及 0.86 万吨一次 PM_{2.5} 排放量。其中, 淘汰小型客车所实现的氮氧化物减排量占减排总量的 27.2%, 一次 PM_{2.5} 减排量占减排总量的 11.9%; 淘汰重型客车所实现的氮氧化物减排量占减排总量的 28.6%, 一次 PM_{2.5} 减排量占减排总量的 58.6%。该政策累计产生 609 亿元社会成本, 其中车辆残值成

本为 643 亿元, 燃油成本节约为 144 亿元, 政策执行成本为 109 亿元。通过社会成本/减排量比值的测算, 本文发现政策成本有效性呈现出阶段性和结构性的特点。

2.1 政策成本有效性随重点淘汰车型变化呈阶段性差异

如图 2 所示, 在 2011 到 2020 年期间, 由于不同阶段涉及的车辆类型变化较大, 该政策在各个实施阶段的社会成本/减排量比值差异较大, 其低值出现在 2017—2019 年间, 该阶段以淘汰重型柴油货车为主。研究结果显示, 这一阶段的氮氧化物单位减排成本在 2~64 万元/吨之间, PM_{2.5} 单位减排成本在 18~850 万元/吨之间。社会成本/减排量比值最高值出现在重点淘汰国 III 汽油车时期(2020 年), 氮氧化物和 PM_{2.5} 单位减排成本分别为 322 万元/吨以及 1 亿元/吨。在重点淘汰国 I 和国 II 小型客车时期(2011—2016 年), 氮氧化物和 PM_{2.5} 单位减排成本分别为 40~107 万元/吨和 1256~3113 万元/吨。

小型客车及重型货车是该政策的两类重点淘汰车型, 与其他车型相比, 减排贡献较为突出(图 3)。小型客车的保有量及淘汰规模占比较高^[1], 重型货车的单车排放因子及总体减排贡献较大^[12]。两类车型的社会成本/减排量比值差异大, 对政策成本有效性的整体变化具有不同的影响。

2.2 小型客车成本有效性随车型拓展呈下降趋势

因单车排放因子和淘汰导致的残值差异等, 国 I 前至国 IV 排放标准小型客车的社会成本/减排量比值总体上呈递增趋势(表 3), 意味着随着补贴淘汰政策不断扩展到更高排放标准的车辆, 小型客车

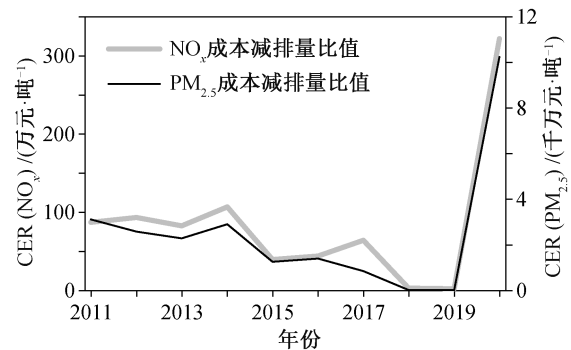


图 2 2011—2020 年氮氧化物和 PM_{2.5} 社会成本/减排量比值

Fig. 2 Cost-emissions reduction ratio of NO_x and PM_{2.5} during 2011—2020

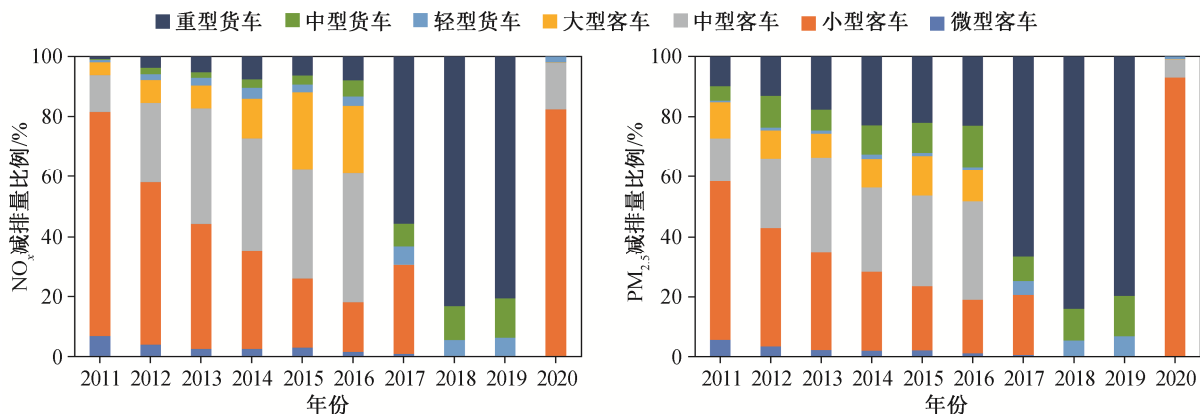


图 3 2011—2020 年不同车型的氮氧化物和 PM_{2.5} 减排量
Fig. 3 NO_x and PM_{2.5} emissions reduction of different vehicle models during 2011–2020

表 3 2011—2020 年不同排放标准小型客车的累计社会成本/减排量的比值

Table 3 Cumulative cost-emissions reduction ratio of minibuses with different emission standards during 2011–2020

类型	CER/(万元·吨 ⁻¹)	
	NO _x	PM _{2.5}
国 I 前	24.16	1932.48
国 I	150.63	2534.55
国 II	307.79	11957.23
国 III	1359.35	27573.40
国 IV	6928.46	178880.13
国 III/国 I 前	56.26	14.27
国 III/国 I	9.02	10.88
国 IV/国 I 前	286.77	92.57
国 IV/国 I	46	70.58

淘汰的政策成本有效性递减。与国 I 前及国 I 标准车型相比, 国 III 和国 IV 标准车型的加速淘汰虽依然能实现一定程度的污染物减排, 但社会成本已经非常高昂, 成本有效性远低于国 I 前及国 I 标准车型。基于对 2011—2020 年不同排放标准小型客车的累计社会成本/减排量比值的分析, 国 III 标准车型的氮氧化物社会成本/减排量比值分别是国 I 前及国 I 标准车型的 56 倍和 9 倍, 国 IV 车型则分别高达 287 倍和 46 倍。国 III 标准车型的 PM_{2.5} 社会成本/减排量比值分别是国 I 前及国 I 标准车型的 14 倍和 11 倍, 国 IV 车型则分别高达 92 倍和 71 倍(表 3)。国 III 和国 IV 车型成本有效性递减趋势显著, 一方面由于国 III 和国 IV 车型的排放情况已相对清洁, 车队更替减排效果不及早期; 另一方面, 由于车辆排

放标准加速升级, 导致车辆残值成本趋高。

2.3 部分重型柴油货车成本有效性优于小型客车

随着车型拓展, 加速淘汰重型柴油货车的成本有效性呈平缓下降的趋势。由于重型货车年行驶里程较长, 且各排放标准车型间燃油成本差异较为显著, 车队更新替代带来的燃油成本节约值较高。同时, 由于货车行驶损耗较大, 国 I~III 车型重型货车的车辆残值成本低于燃油成本节约, 即存在社会成本节约, 体现为社会成本/减排量比值为负值。随着车型的拓展, 虽然国 IV 排放标准重型货车社会成本/减排量比值略有上升(表 4), 但成本有效性仍远优于小型客车。

2.4 敏感性分析结果

由于本文使用的参数来源较多, 有必要对结果的不确定性加以说明。本文采用蒙特卡洛模拟方法对成本有效性的测算结果进行单因素敏感性分析。具体而言, 使用 Crystal Ball 软件对运算结果进行 50000 次的模拟运算。模拟运算中的基准值及参数分布由文献调研结合实际数据拟合后得到。模拟结

表 4 2011—2020 年不同排放标准重型货车的累计社会成本/减排量比值

Table 4 Cumulative cost-emissions reduction ratio for heavy-duty trucks with different emission standards between 2011 and 2020

类型	CER/(万元·吨 ⁻¹)	
	NO _x	PM _{2.5}
国 I	-7.30	-58.44
国 II	-6.80	-44.66
国 III	-3.18	-47.51
国 IV	0.30	4.53

果如下: 1) 氮氧化物减排量在 90% 的显著性水平下置信区间为 [5.6, 18.14] 万吨, $PM_{2.5}$ 减排量在 90% 的显著性水平下置信区间为 [0.61, 0.85] 万吨, 对污染物减排量测算不确定性影响较大的参数是新旧车辆排放因子差异 (98%); 2) 总社会成本在 90% 的显著性水平下置信区间为 [249.24, 761.64] 亿元, 对总社会成本估计结果不确定性贡献居前三位的参数为车队历史交易价格 (42%)、新旧车辆百公里油耗差异 (-36.9%) 和年行驶里程 (-4.6%); 3) 氮氧化物社会成本/减排量比值在 90% 的显著性水平下置信区间为 [9.2, 85.2] 万元/吨, $PM_{2.5}$ 社会成本/减排量比在 90% 的显著性水平下置信区间为 [111.2, 1014.5] 万元/吨, 社会成本/减排量比测算过程中, 年行驶里程 (-72.3%)、车队历史交易价格 (13.8%)、新旧车辆百公里油耗差异 (-11.5%) 对结果的不确定性贡献最大。

综合以上分析结果可以发现, 蒙特卡洛模拟的结果与此前成本有效性分析部分测算的结果大体上一致。车队历史交易价格、年行驶里程以及新旧车辆排放因子差异对测算结果的影响较为显著。一方面说明成本有效性分析结果具有一定的稳健性, 另一方面说明从社会成本视角核算, 将车辆残值成本以及燃油成本差异纳入政策分析具有一定的合理性和必要性。

3 结论与讨论

本文从社会成本的角度, 借助北京市长期持续实施老旧机动车补贴淘汰政策以来积累的丰富数据集, 对该政策的减排效果、社会成本以及成本有效性进行回溯性动态观察和量化测算, 得到如下结论。

1) 研究覆盖时期内, 政策的成本有效性变化并非单调递减, 而是呈现阶段性特征。重点淘汰柴油货车时期成本有效性较高, 重点淘汰国 III 汽油车辆时期成本有效性较差。

2) 随着补贴覆盖车型的范围扩大, 加速淘汰小型客车的成本有效性呈现明显递减趋势, 国 III 和国 IV 排放标准车型小型客车的递减趋势尤为显著。加速淘汰国 III 和国 IV 车型虽能实现一定的污染物减排, 但社会成本已经非常高昂。

3) 随着车型范围扩大, 加速淘汰重型柴油货车的成本有效性呈现平缓递减的趋势, 但加速淘汰国 IV 车型重型货车的成本有效性仍远优于小型客车。

4) 补贴淘汰政策设计应借助成本有效性分析, 结合本地车队排放结构情况适时进行调整, 以期提

高政策补贴对象的针对性。建议老旧机动车补贴淘汰政策应继续强化对重型柴油货车的政策倾斜, 审慎考虑将更高排放标准的小型客车纳入政策补贴范围。

上述结论主要从大气污染物减排的视角出发, 随着“双碳”目标的提出, 碳减排也需要纳入政策设计考虑。Kim 等^[21]的研究表明, 大规模实施加速淘汰政策可能导致碳排放增加。因此, 后续政策调整过程中, 除关注大气污染物减排的成本有效性之外, 还应充分考虑由于车辆加速更新导致的额外碳排放增加等问题。

另外, 本文假设消费者偏好保持稳定, 车型选择、车辆用途和驾驶习惯等不因新车替代发生变化。尽管这个假设可能给部分参数(如排放因子和年行驶里程等)的选取和估算结果带来不确定性, 但总体而言, 对结论的方向性影响有限。此外, 虽然加速淘汰国 IV 车型重型柴油货车从社会成本视角具有一定的经济合理性, 但重型货车加速淘汰政策主要由车主承担的财务成本较高。为进一步提高政策执行的效果, 后续研究中可增加对货车所有者的财务成本及相关福利损失问题的关注, 补充其他配套支持政策的可行性研究。

参考文献

- [1] 中国汽车市场年鉴编委会. 中国汽车市场年鉴 (2001-2020). 北京: 中国商业出版社, 2001-2020
- [2] Hu M, Tang Q, Peng J, et al. Study on characterization and source apportionment of atmospheric particulate matter in China. *Environ Sustain*, 2011, 36: 15-19
- [3] Alberini A, Harrington W, McConnell V. Determinants of participation in accelerated vehicle-retirement programs. *The RAND Journal of Economics*, 1995, 26(1): 93-112
- [4] Hahn R W. An economic analysis of scrappage. *The RAND Journal of Economics*, 1995, 26(2): 222-242
- [5] Dill J. Estimating emissions reductions from accelerated vehicle retirement programs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2004, 9(2): 87-106
- [6] Adda J, Cooper R. Balladurette and Juppette: a discrete analysis of scrapping subsidies. *Journal of Political Economy*, 2000, 108(4): 778-806
- [7] Li S, Linn J, Spiller E. Evaluating “cash-for-clun-

- kers”: program effects on auto sales and the environment. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2013, 65(2): 175–193
- [8] 张秀丽, 吴丹, 张世秋. 北京市淘汰高污染排放车辆政策研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(2): 297–304
- [9] Zhou J, Wang J, Jiang H, et al. Cost-benefit analysis of yellow-label vehicles scrappage subsidy policy: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region of China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 94–103
- [10] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2020) [EB/OL]. (2020-08-10) [2021-03-16]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/>
- [11] Xiao C, Chang M, Guo P, et al. Comparison of the cost-effectiveness of eliminating high-polluting old vehicles and imposing driving restrictions to reduce vehicle emissions in Beijing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 67: 291–302
- [12] 环境保护部科技标准司. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南[S/OL]. (2014) [2021-03-28]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587831090.pdf>
- [13] 国家环保总局科技标准司. HJ/T 180—2005城市机动车排放空气污染测算方法[S/OL]. (2005) [2021-03-28]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqhbh/xgbz/200510/t20051001_68915.shtml
- [14] 北京交通规划研究中心. 北京市交通发展年度报告 [EB/OL]. (2001–2020) [2021-03-28]. <https://www.bjtrc.org.cn/List/index/cid/7.html>
- [15] 甘蜜, 刘晓波, 李丹丹. Preliminary Investigation and research on freight industry [R/OL]. 成都: 西南交通大学交通运输与物流学院, 2019 [2021-03-28]. http://www.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GJTS200802011.htm
- [16] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2020
- [17] 建设部国家计委. 建设项目经济评价方法与参数(第3版). 北京: 中国计划出版社, 2008
- [18] 工业和信息化部. GB 19578—2021 乘用车燃料消耗量限值[S/OL]. (2021-02-23) [2021-03-28]. https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcjd/art/2021/art_71be955cd70049208f7fb37576015fc9.html
- [19] 毛世越, 秦兰芝, Ben Dror M, 等. 2018 中国乘用车实际道路行驶与油耗分析年度报告[R/OL]. iCET, 2018: 27–34 [2021-03-28] <http://www.icet.org.cn/admin/upload/2019081537990401.pdf>
- [20] 林伯强. 中国油价为何比美国高. *中国科学报*, 2012-04-26 (7)
- [21] Kim H C, Ross M H, Keoleian G A. Optimal fleet conversion policy from a life cycle perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2004, 9(3): 229–249