

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.02.029

碳达峰目标下的汽车电动化碳减排效果研究

童瑞咏¹, 毛保华^{1,2}, 魏润斌¹, 肖中圣¹, 黄俊生¹

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044;

2. 北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

摘要: 围绕2030年碳达峰目标,建立了全生命周期下的汽车电动化碳排放测算模型,测算了2021—2035年我国汽车全生命周期的碳排放总量,研究了发电端能源结构、纯电动汽车的综合性能及其投放策略等因素对汽车电动化背景下的碳排放总量水平的影响。结果表明:随着汽车电动化水平的提升,汽车碳排放总量在2031年达到峰值15.53亿t;此后由于纯电动汽车生产阶段车辆数稳定,行驶阶段车辆规模将不断扩大,发展至2035年时碳排放总量较峰值下降幅度为3.53%;因汽车电动化发展带来的碳减排效果有所体现,发电端能源结构中火电占比下降1%和2%时,汽车碳排放总量峰值较基准情景峰值分别下降0.64%和1.16%,达峰时间提前至2029年;纯电动汽车的百公里电耗水平在2035年降至11.0、9.0 kW·h/(100 km)时,碳排放量峰值均较基准情景有所下降且提前至2029年,2035年的碳排放总量相较于各自的峰值分别下降5.19%和6.47%;如进一步加大电动汽车投放力度,若新增纯电动汽车占比恒为40%,短期内由于生产阶段碳排放量偏高,汽车碳排放总量将高于基准情景0.11~0.31亿t,之后因处于行驶阶段的纯电动汽车数量规模化带来的碳减排效应放大,达峰时间提前至2027年,这意味着降低发电端能源结构中火电占比、提高纯电动汽车综合性能、合理制订纯电动汽车投放策略,将助力汽车的碳减排。

关键词: 汽车工程;汽车电动化;碳排放测算;全生命周期;投放策略

中图分类号: U461.99

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 02-0238-08

Study on Carbon Emission Reduction Effect of Automotive Electrification under Goal of Carbon Peaking

TONG Rui-yong¹, MAO Bao-hua^{1,2}, WEI Run-bin¹, XIAO Zhong-sheng¹, HUANG Jun-sheng¹

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Key Laboratory of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport of Transport Industry,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the goal of carbon peaking in 2030, the carbon emission calculation model of automotive electrification in entire life cycle is established. The total carbon emissions of China's automobiles in entire life cycle from 2021 to 2035 are calculated. The influences of the factors such as the energy structure at the power generation end, the comprehensive performance of battery electric vehicles and the launch strategies on the total carbon emissions under the background of automotive electrification are studied. The result shows that (1) The total carbon emissions of automobiles will reach 1.553 billion tons in 2031 at peak with the development of automotive electrification. (2) Since then, due to the stable number of vehicles in production period and the expanding scales of vehicles in driving period, the total carbon emissions of automobiles will decrease by 3.53% in 2035 compared with the peak. (3) As the carbon emission reduction effect brought by the development of automobile electrification is reflected, when the proportion of thermal power in the energy

收稿日期: 2022-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71971021)

作者简介: 童瑞咏 (1997-), 女, 江苏扬州人, 博士研究生. (20114047@bjtu.edu.cn)

structure of electricity generation end decreases by 1% and 2%, the peak of automobiles' carbon emissions will decrease by 0.64% and 1.16% respectively compared with the baseline scenario, and the total carbon emissions of automobiles will reach the peak in 2029. (4) When power consumption per 100 kilometers of battery electric vehicles reduces to 11.0, 9.0 kW · h/(100 km) in 2035, the peak of automobiles' carbon emissions will be lower than the baseline scenario and will appear in 2029, and the total carbon emissions will decrease by 5.19% and 6.47% in 2035 respectively compared with their respective peaks. (5) If we further increase the launch of electric vehicles, when the proportion of new battery electric vehicles is 40% constantly, due to the higher carbon emissions in the production stage in the short term, the total carbon emissions of automobiles will be 11–31 million tons higher than the baseline scenario. Then, the carbon emissions reduction effect will be amplified due to the large-scale number of battery electric vehicles in driving period, and the total carbon emissions of automobiles will reach the peak in 2027 which is advanced. It means that reducing the proportion of thermal power at the power generation end, improving the comprehensive performance of battery electric vehicles, and reasonably formulating the battery electric vehicles launch strategies will help reduce carbon emissions.

Key words: automobile engineering; automobile electrification; carbon emission calculation; entire life cycle; launch strategy

0 引言

近年来,我国机动化发展迅速,汽车保有量逐年上升。2020年底汽车保有量达2.81亿veh,其中燃油车保有量为2.76亿veh,新能源汽车保有量492.05万veh^[1]。中国汽车工程学会预测未来汽车保有量将继续上升,2025年、2030年、2035年的汽车保有量分别为4, 4.5, 4.8亿veh^[2]。汽车保有量的增长将对环境产生不利影响^[3]。为加速推进碳达峰进程^[4],汽车需朝着“低碳化”方向发展^[2],国务院拟定了具体工作计划,印发了《2030年前碳达峰行动方案》,提出了“运输工具装备低碳转型、大力推广新能源汽车”的倡议,设定了“到2030年,当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右”的目标^[5]。这意味着未来15a内,新增新能源汽车占新增汽车总数的比例将提升35%^[5]。

实现我国可持续交通的行业革命之一即为汽车电动化^[6]。很多学者从单一车辆全生命周期角度研究了新能源汽车与传统燃油车相比的碳减排效果与潜力,范围涉及车辆生产、行驶和报废的全生命周期阶段,采用的方法包括生命周期评价^[7]、分层混合生命周期评估^[8]、油井至车轮分析^[9]方法等。研究发现,相较于燃油车,新能源汽车行驶过程接近零排放^[10],但从全生命周期角度来看,行驶过程的碳排放转移至电力供应端^[11],且车辆生产阶段的碳排放量大于燃油车^[12],通过进一步分析比较,新能源汽车行驶阶段的优势大于生产阶段的劣势,传统

燃油车全生命周期单位里程碳排放高于混合动力汽车和纯电动汽车^[13],这与其他国家的测算结论^[14]类似。此外,从全生命周期来看,新能源汽车在行驶阶段并非零排放,驱动车辆运行的电力在供应阶段将产生二氧化碳,使得汽车电动化的减排效果将受到发电端能源结构中煤电占比等因素的影响^[15],高煤电占比地区新能源汽车推广产生的减排效果并不显著^[16]。

汽车全生命周期各阶段只会产生二氧化碳,故把握汽车全生命周期的碳排放总量水平,利于达成碳减排、碳达峰的目标。当前单一车辆全生命周期各阶段的二氧化碳排放水平在国内外已被广泛研究,而“碳达峰”是针对一定地域范围的生态环境发展目标,因此某区域汽车全生命周期的碳排放量及发展趋势有待深入测算与评估。本研究在燃油车、纯电动汽车全生命周期各阶段碳排放水平既有研究基础上,结合当前我国交通运输行业的碳达峰工作计划及相关部门为实现碳达峰制定的具体行动方案,考虑将未来汽车保有量结构与所处生命周期的阶段相匹配,测算大力推广新能源汽车背景下我国汽车的未来二氧化碳排放总量水平,分析影响碳排放量的因素,探寻汽车电动化趋势下有效的碳减排策略。

1 全生命周期下的汽车电动化碳排放测算模型

本研究对象为全生命周期下的汽车电动化二氧化碳排放总量,不讨论其他温室气体的排放。首先需界定测算边界,从车辆类型来看,包括传统燃油

车和新能源汽车；从车辆全生命周期的各阶段来看，包括车辆生产制造阶段、行驶阶段、报废回收阶段。车辆生产制造阶段考虑每年制造新车所需原材料的开采加工、新车的生产装配及配送等过程产生的二氧化碳排放；车辆行驶阶段主要考虑不同类型车辆对应使用的燃料全生命周期的二氧化碳排放；车辆报废回收阶段考虑不同类型车辆的报废车辆零部件拆分存放及运输等过程的二氧化碳排放。

生产制造阶段、行驶阶段、报废回收阶段的汽车数量分别基于新增车辆数、汽车保有量数、报废车辆数。汽车保有量的增减与该年新增车辆数、报废车辆数有关^[17]，汽车保有量测算模型为：

$$U_{i,k} = U_{i,k-1} + V_{i,k} - W_{i,k}, \quad (1)$$

式中， k 为测算年份； i 为不同车辆类型， $i=1, 2$ 分别为传统燃油车、新能源汽车； $U_{i,k}$ 为第 k 年类型 i 的保有量数； $V_{i,k}$ 为第 k 年类型 i 的新增车辆数； $W_{i,k}$ 第 k 年类型 i 的报废车辆数。

为研究碳达峰目标下考虑全生命周期的汽车二氧化碳排放量发展趋势，以年度二氧化碳排放总量为研究对象，建立汽车碳排放测算模型：

$$E_{\text{总},k} = \sum_{i=1}^2 (E_{i,1,k} \cdot V_{i,k} + E_{i,2,k} \cdot L_{i,k} \cdot U_{i,k} + E_{i,3,k} \cdot W_{i,k}), \quad (2)$$

式中， $E_{i,1,k}$ 为第 k 年生产制造第 i 种车辆的单位碳排放； $E_{i,2,k}$ 为第 k 年车辆类型 i 行驶单位里程的碳排放； $L_{i,k}$ 为第 k 年车辆类型 i 的平均行驶里程； $E_{i,3,k}$ 为第 k 年报废回收阶段第 i 种车辆的单位碳排放。

2020年新能源汽车中纯电动汽车占比达81.30%，未来纯电动汽车规模将进一步扩大^[18]。假

设新能源汽车均为纯电动汽车，行驶阶段纯电动汽车单位里程的碳排放与发电端能源结构、百公里电耗水平等因素有关，测算模型为：

$$E_{2,2,k} = \left(\sum_l M_{k,l} \cdot \varphi_{k,l} \cdot Q_{k,l} \cdot C_{k,l} \cdot o_{k,l} \right) \cdot \frac{44}{12} \cdot \frac{P_k \cdot 100}{1 - \eta_k}, \quad (3)$$

式中， $M_{k,l}$ 为第 k 年第 l 种发电方式下的单位煤炭消费量； $\varphi_{k,l}$ 为第 k 年发电方式 l 的发电量与总发电量之比； $Q_{k,l}$ 为第 k 年第 l 种发电方式下单位质量的煤完全的燃烧时所产生的热量； $C_{k,l}$ 为第 k 年第 l 种发电方式下的单位热值含碳量； $o_{k,l}$ 为第 k 年第 l 种发电方式下燃料中的碳氧化率； $l=1, 2, 3, 4$ 时分别对应火电、水电、核电、风电形式； $\frac{44}{12}$ 为二氧化碳与碳的相对分子质量之比； P_k 为第 k 年纯电动汽车百公里电耗水平；100为单位换算系数； η_k 为第 k 年电网线损率。

2 碳达峰目标下我国汽车电动化碳排放测算

设置基准测算情景为，传统燃油车和新能源汽车在生产制造、行驶、报废回收各阶段的碳排放因子均与现状年一致，2种车辆类型处于各阶段的车辆数逐年变化。首先，测算纯电动汽车行驶阶段单位里程碳排放水平，从现状年的发电端能源结构、百公里电耗水平出发。假设发电端能源结构中仅火电产生二氧化碳^[19]，且火力发电均采用燃煤方式。参考国家能源局、发改委等国家有关部门发布的统计数据、行业标准等资料，本研究测算模型相关参数取值如表1所示。

表1 纯电动汽车行驶阶段单位里程碳排放测算模型参数取值

Tab. 1 Parameter values for carbon emission calculation model of electric vehicles per unit mileage during driving

参数名称	$M_{k,l}/[\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	$\varphi_{k,l}/\%$	$Q_{k,l}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$C_{k,l}/(\text{kg} \cdot \text{GJ}^{-1})$	$o_{k,l}/\%$	$P_k/[\text{kW} \cdot \text{h}/(100 \text{ km})^{-1}]$	$\eta_k/\%$
取值	304.90 ^[16]	69 ^[19]	29.307 6 ^[20]	25.50 ^[21]	98 ^[22]	14.50 ^[16]	5.60 ^[16]

基准测算情景下，未来年燃油车全生命周期、纯电动汽车生产制造阶段和报废回收阶段单位碳排放及2种车辆类型的年平均行驶里程取值受汽车电动化的影响较小，参考文献[8-9]、[23-24]取为定值，纯电动汽车行驶阶段单位里程的碳排放通过式(3)测算得到。表2给出了汽车碳排放测算相关参数取值。

依据汽车未来的技术路线中的未来年汽车保有量总量预测值，假设车辆投入使用后15 a报废，结合历年不同车辆类型的新增车辆数，得到未来年不同车辆类型的报废车辆数，进而根据国家下发的碳

表2 全生命周期下的汽车电动化碳排放测算模型参数取值

Tab. 2 Parameter values for carbon emission calculation model of automobile electrification in entire life cycle

参数名称	$E_{i,1,k}/[(\text{kgCO}_2 \cdot \text{veh}^{-1})]$	$E_{i,2,k}/[(\text{kgCO}_2 \cdot (\text{veh} \cdot \text{km})^{-1})]$	$E_{i,3,k}/[(\text{kgCO}_2 \cdot \text{veh}^{-1})]$	$L_{i,k}/\text{km}$
传统燃油车	7 878.2 ^[8-9,23]	207.195 1 ^[8-9,23]	391.9 ^[8-9,23]	15 000 ^[8,24]
纯电动汽车	11 542.6 ^[8-9,23]	86.066 5	130.4 ^[8-9,23]	15 000 ^[8,24]

达峰行动方案中的未来年新增新能源交通工具占比，得到不同车辆类型的新增车辆数，从而推算得到分类别的汽车保有量。2021—2035年我国汽车保有量结构预测如图1所示。

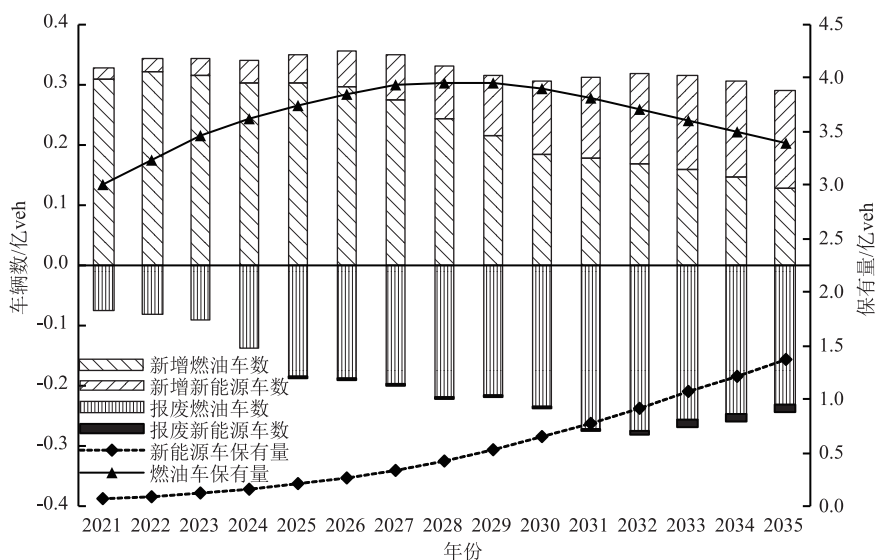


图1 我国汽车保有量结构

Fig. 1 Structure of automobile ownership in China

进一步测算得到基准情景的碳达峰目标下汽车全生命周期二氧化碳排放总量水平结果,如图2所示。可以看出,我国汽车全生命周期的碳排放总量将逐年上升,但增速从7.72%逐步放缓,在2032年时转为负值,意味着汽车碳排放总量于2031年达峰,峰值为15.53亿t,之后呈下降趋势,增速缓慢增长。在未来5~6 a内,全年汽车的碳排放总量增量,是由于燃油车行驶阶段、

纯电动汽车生产制造阶段分别为2种车辆类型的高碳排阶段,未来年燃油车行驶车辆数仍将增加、纯电动汽车生产制造车辆数将高速增长,叠加作用下汽车的碳排放总量大大增长。2027年后,随着电动汽车规模化生产与上路行驶,燃油车生产制造、行驶阶段的碳排放量下降,将推动汽车的碳排放达峰。这也说明汽车电动化的发展趋势将助力碳减排。

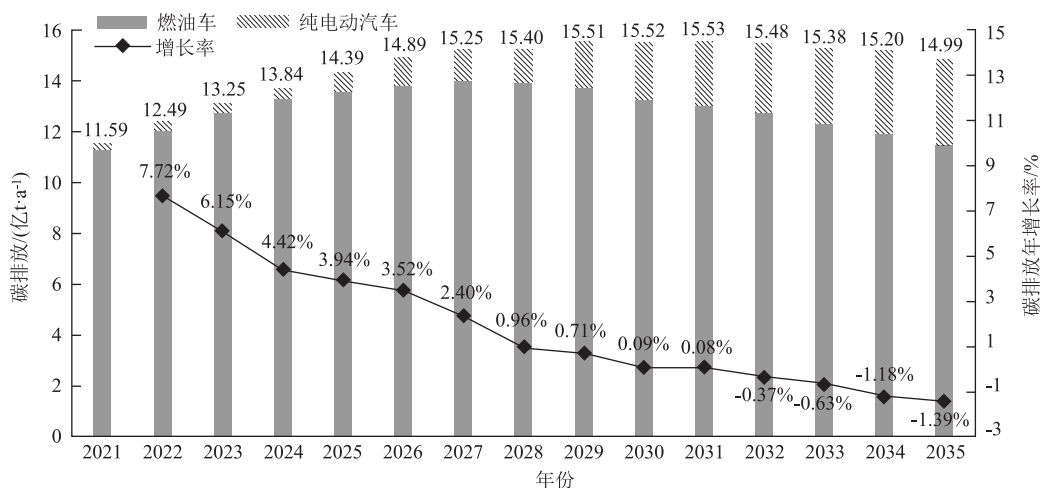


图2 我国汽车全生命周期的碳排放总量测算结果

Fig. 2 Carbon emissions calculation of automobiles in entire life cycle in China

对比《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中碳排放的核算结果,2031年时燃料周期的二氧化碳排放量约为14.5亿t^[2],因不包括汽车生产阶段、报废阶段,故低于图2中15.53亿t的碳排放值。

3 汽车电动化碳减排效果的影响因素分析

如何有效控制纯电动汽车的二氧化碳排放总量、

放大汽车电动化的碳减排优势,值得深入探究。从汽车电动化碳减排效果的关键影响因素入手,以第2部分的测算情景为基准,分析发电端能源结构、纯电动汽车的综合性能及其投放策略等因素改变时,汽车全生命周期碳排放总量水平的差异。

3.1 发电端能源结构

纯电动汽车在行驶过程中虽然没有尾气排放,

但所依靠电能的生产、输送等过程将产生二氧化碳^[25],这与发电端能源结构紧密关联^[26]。当前我国全社会发电端能源结构现状为,2020年火电占比达69%,其中约90%源自燃煤发电,未来以煤炭发电为主的发电端能源结构仍将持续,但清洁能源发电的占比有望大大增加^[27]。

结合美国能源信息署(Energy Information Administration, EIA)于2019年发布的《展望2050国际能源》报告^[28]中关于未来中国发电端能源结构的预测结果,设置3种发电端能源结构不同的情景:情景1为未来火电发电量占比逐年下降1%;情景2为未来火电发电量占比先逐年下降2%、10 a后逐年下降1%;情景3为未来火电发电量占比逐年下降2%。在未来2021—2025年,由于纯电动汽车处于行驶阶段的车辆数较小,发电端能源结构调整对碳排放总量影响不大,不作讨论。2025—2035年各情景下我国汽车全生命周期碳排放总量对比如图3所示。

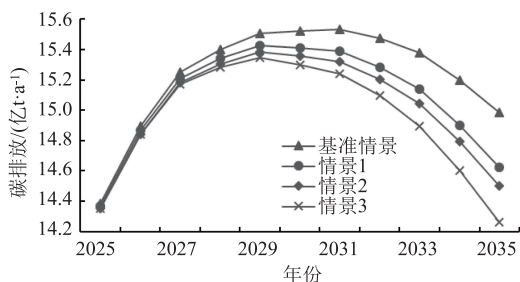


图3 调整发电端能源结构下我国汽车全生命周期碳排放量
Fig. 3 Carbon emissions of automobiles in entire life cycle in China under adjustment of energy structure at power generation end

调整发电端能源结构的情景1~3中,我国汽车全生命周期碳排放总量均在2029年达峰,分别为15.43、15.37、5.35亿t,比基准情景的峰值下降了0.64%、1.03%、1.16%。相较于基准情景,火电占比的下降将实现我国汽车全生命周期碳排放总量的减少,有利于汽车碳排放达峰时间提前。3个调整情景中,2029年时煤电发电量较2020年下降9%、14%、18%,发电端能源结构的改善推动了汽车碳排放总量达到峰值。发展至2035年时,基准情景较对应情景的峰值下降了3.53%,而情景1~3分别较对应情景的峰值下降了5.20%、5.72%、7.07%,这意味着,在道路上行驶的纯电动汽车较先前有了大幅增长之后,改善发电端能源结构带来的碳减排效果将不断放大。

3.2 纯电动汽车综合性能

百公里电耗水平综合体现了纯电动汽车动能回

收机制、驱动电机效率、车身轻量化等多项性能,对纯电动汽车行驶阶段的碳排放影响较大^[29],随着纯电动汽车技术发展,其自身性能得到优化,百公里电耗水平将有所下降。基准情景中,纯电动汽车百公里电耗水平为15.0 kW·h/(100 km)。国务院于2020年10月印发了《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》^[18],其中提出了“2025年纯电动乘用车平均电耗降至12.0 kW·h/(100 km)”的发展愿景,故设置情景1~4为未来年百公里电耗水平逐步下降,至2025年为kW·h/(100 km),至2035年分别降至11.0、10.0、9.5、9.0 kW·h/(100 km)。2025—2035年期间5种情景下我国汽车全生命周期碳排放总量对比如图4所示。

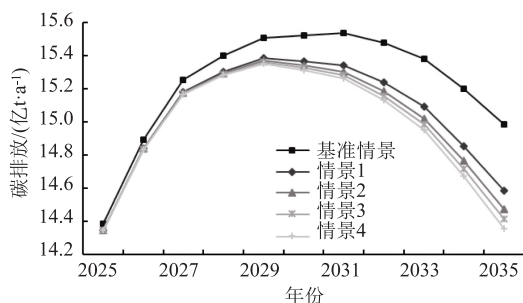


图4 改善百公里电耗水平下我国汽车全生命周期碳排放量
Fig. 4 Carbon emissions of automobiles in entire life cycle in China under improvement of power consumption level per 100 km

在4种改善情景中,我国汽车全生命周期碳排放总量均有所下降,碳达峰时间均提前。百公里电耗水平改善幅度越大,碳减排效果越显著,在情景1~4中,2035年时的碳排放总量相较于各情景的峰值,分别下降5.19%、5.83%、6.15%、6.47%。提升纯电动汽车综合性能,实现百公里电耗水平的优化,将是助推碳减排的途径之一。

3.3 纯电动汽车投放策略

不同的纯电动汽车投放策略,将同时影响未来年纯电动汽车生产阶段、行驶阶段的碳排放量。在第2部分的基准情景中,假设未来年新增纯电动汽车占比逐年上升,在2030年达40%^[3]。考虑未来新增车辆总数不变下,设置情景1~2分别对应不同的纯电动汽车投放策略。情景1为适当增大每年纯电动汽车的投放力度,在2025年达20%,2030年达40%,2035年达50%以上^[2];情景2考虑纯电动汽车的投放量激增的激进情况,2021—2035年新增纯电动汽车比例恒为40%。相较于基准情景,2种情景加大了纯电动汽车的投放力度。图5给出了3种情

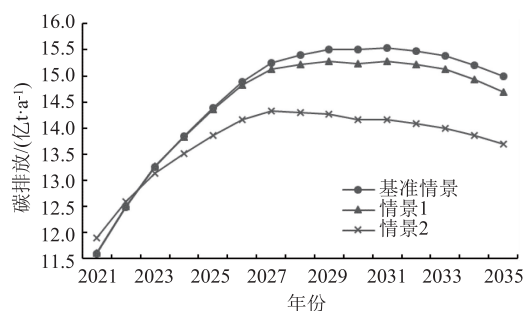


图5 加大电动车投放力度下我国汽车全生命周期碳排放量

Fig. 5 Carbon emissions of automobiles in entire life cycle in China under increasing launching of electric vehicles

景下我国汽车全生命周期碳排放总量情况。

情景1中,因新增车辆中纯电动汽车占比提高,纯电动汽车新增数相应增加。2021—2023年受电动汽车生产阶段碳排放增加量大的影响,汽车全生命周期碳排放总量分别高于基准情景0.02,0.02,0.01亿t。此后由于投入使用的车辆中电动汽车占比有所提高,从而使得行驶阶段的碳排放总量低于基准情景,由此导致全生命周期碳排放总量的降低。在纯电动汽车继续保持超高速增长背景下,2035年碳排放总量较峰值下降3.82%。

情景2中,在2021—2022年,因新增纯电动汽车占比较现状年涨幅大,纯电动汽车生产阶段碳排放量远高于基准情景,由此导致汽车碳排放总量分别高于基准情景0.31和0.11亿t,此后虽新增车辆中纯电动汽车占比不减,但先前燃油车被大量替代,纯电动汽车行驶阶段带来的碳减排效益显著,达峰时间较基准情景大大提前,至2027年达到该情景下汽车全生命周期碳排放量峰值,为14.33亿t。

扩大纯电动汽车的规模,虽可能导致未来短期内的汽车碳排放总量超过基准情景,但从长远来看,合理增加纯电动汽车的投放量有利于控制汽车全生命周期碳排放总量、提前碳达峰时间。

4 结论

本研究构建了考虑全生命周期的汽车电动化碳排放测算模型,测算了碳达峰目标下我国汽车二氧化碳排放总量水平,进一步考察了发电端能源结构、纯电动汽车综合性能、纯电动汽车投放策略等多个因素对汽车碳排放达峰情况的影响,得到主要结论如下:

(1)从基准情景的汽车全生命周期的碳排放总量预测值来看,其峰值约为15.53亿t,将出现在2031年。后期随着纯电动汽车生产阶段车辆数趋于

稳定、行驶阶段车辆数不断扩大,汽车碳排放总量呈下降趋势,2035年较峰值下降3.53%。

(2)在发电端能源结构中火电占比逐年下降1%和2%情景中,2035年的碳排放总量分别较相应情景的峰值下降5.20%和7.07%,优于基准情景(3.53%)。因此,调整发电端能源结构,火电占比下调、清洁能源占比上升,将带来较好的碳减排效果。

(3)纯电动汽车综合性能通过百公里电耗水平表征,2035年百公里电耗水平分别为14.5,11.0,9.0 kW·h/(100 km)时,碳排放总量相较于各自的峰值下降3.53%,5.19%,6.47%,百公里电耗水平的改善幅度将影响碳减排效果。

(4)新增电动汽车若在2025年达20%,2030年达40%,2035年达50%以上,短期内将导致年碳排放总量高于基准情景0.01~0.02亿t,但随着行驶阶段的燃油车被纯电动汽车替代,纯电动汽车带来的减排效应逐渐显现和不断放大,2035年碳排放总量较该情景的峰值下降3.82%。适当扩大纯电动汽车数量规模,有望降低汽车全生命周期碳排放总量,提前实现达峰目标。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国公安部. 2020年全国新注册登记机动车3328万辆 新能源汽车达492万辆 [EB/OL]. (2021-01-07) [2021-11-20]. <https://app.mps.gov.cn/gdnps/pc/content.jsp?id=7647257>. Ministry of Public Security of PRC. 33. 28 Million Newly Registered Motor Vehicles Nationwide Including 4.92 Million New Energy Vehicles in 2020 [EB/OL]. (2021-01-07) [2021-11-20]. <https://app.mps.gov.cn/gdnps/pc/content.jsp?id=7647257>.
- [2] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0 [EB/OL]. (2020-10-27) [2021-11-22]. <http://www.sae-china.org/news/society/202010/3957.html>. China Society of Automotive Engineers. Energy-saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap 2.0 [EB/OL]. (2020-10-27) [2021-11-22]. <http://www.sae-china.org/news/society/202010/3957.html>.
- [3] International Energy Agency. Global Energy Review 2019 [R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [4] 中共中央,国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-10-24) [2022-04-29]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.

- Central Committee of Communist Party of China, State Council. Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of New Development Philosophy [EB/OL]. (2021-10-24) [2022-04-29]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [5] 国务院. 关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-26) [2021-11-21]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- State Council. Notice on Issuing Action Plan for Carbon Dioxide Peaking before 2030 [EB/OL]. (2021-10-26) [2021-11-21] http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [6] WU Y, YANG Z D, LIN B H, et al. Energy Consumption and CO₂ Emission Impacts of Vehicle Electrification in Three Developed Regions of China [J]. Energy Policy, 2012, 48: 537-550.
- [7] 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 等. 北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 [J]. 环境科学, 2015 (3): 1105-1116.
- SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, et al. Comparative Life Cycle Environmental Assessment between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing [J]. Environmental Science, 2015 (3): 1105-1116.
- [8] XIONG S Q, WANG Y S, BAI B, et al. A Hybrid Life Cycle Assessment of the Large-scale Application of Electric Vehicles [J]. Energy, 2021, 216 (11): 119314.
- [9] ORSI F, MURATORI M, ROCCO M, et al. A Multi-dimensional Well-to-wheels Analysis of Passenger Vehicles in Different Regions: Primary Energy Consumption, CO₂ Emissions, and Economic Cost [J]. Applied Energy, 2016, 169: 197-209.
- [10] LI P L, ZHAO P J, BRAND C. Future Energy Use and CO₂ Emissions of Urban Passenger Transport in China: A Travel Behavior and Urban Form Based Approach [J]. Applied Energy, 2018, 211: 820-842.
- [11] ZHAO F Q, LIU F Q, LIU Z W, et al. The Correlated Impacts of Fuel Consumption Improvements and Vehicle Electrification on Vehicle Greenhouse Gas Emissions in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 702-716.
- [12] QIAO Q Y, ZHAO F Q, LIU Z W, et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Electric Vehicles in China: Combining the Vehicle Cycle and Fuel Cycle [J]. Energy, 2019, 177: 222-233.
- [13] HOFMANN J, GUAN D B, CHALVATZIS K, et al. Assessment of Electrical Vehicles as a Successful Driver for Reducing CO₂ Emissions in China [J]. Applied Energy, 2016, 184: 995-1003.
- [14] LOGAN K G, NELSON J D, BRAND C, et al. Phasing in Electric Vehicles: Does Policy Focusing on Operating Emission Achieve Net Zero Emissions Reduction Objectives? [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2021, 152: 100-114.
- [15] DOUCETTE R T, MCCULLOCH M D. Modeling the CO₂ Emissions from Battery Electric Vehicles Given the Power Generation Mixes of Different Countries [J]. Energy Policy, 2011, 39 (2): 803-811.
- [16] 赵子贤, 邵超峰, 陈珏. 中国省域私人电动汽车全生命周期碳减排效果评估 [J]. 环境科学研究, 2021, 34 (9): 2076-2085.
- ZHAO Zi-xian, SHAO Chao-feng, CHEN Jue. Effects of Private Electric Vehicles on Carbon Emission Reduction in China during Whole Life Cycle [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34 (9): 2076-2085.
- [17] 陈娇杨, 宋国华, 于雷. 面向城市群交通规划的道路碳排放测算与分析方法 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (2): 122-128, 136.
- CHEN Jiao-yang, SONG Guo-hua, YU Lei. An Estimation and Analysis Method for Road Carbon Emissions in Urban Agglomeration Transport Planning [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (2): 122-128, 136.
- [18] 国务院办公厅. 关于印发新能源汽车产业发展规划 (2021—2035 年) 的通知 [EB/OL]. (2020-11-02) [2021-11-22]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm.
- General Office of State Council. Notice on Issuing The New Development Plan for NEV Industry from 2021 to 2035 [EB/OL]. (2020-11-02) [2021-11-22]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm.
- [19] 国家能源局. 国家能源局发布 2020 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2021-01-20) [2021-11-23]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.
- National Energy Administration. National Energy Administration Released 2020 National Power Industry Statistics [EB/OL]. (2021-01-20) [2021-11-23]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.
- [20] DL/T 904—2015, 火力发电厂技术经济指标计算方法 [S].
- DL/T 904—2015, Calculation Method of Technical and Economic Indexes of Thermal Power Plant [S].
- [21] 邵二刚, 李社红, 吴代赦, 等. 基于发热量的中国煤炭碳含量研究 [J]. 地球与环境, 2014, 42 (1): 95-101.

- GAO Er-gang, LI She-hong, WU Dai-she, et al. The Average Carbon Content per Unit Energy in Chinese Coals [J]. *Earth and Environment*, 2014, 42 (1): 95-101.
- [22] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行) [EB/OL]. (2011-05) [2021-11-24]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>.
National Development and Reform Commission. Guidelines for Preparation of Provincial Greenhouse Gas Inventories (for Trial Implementation) [EB/OL]. (2011-05) [2021-11-24]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>.
- [23] YANG L, YU B Y, YANG B, et al. Life Cycle Environmental Assessment of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 285: 124899.
- [24] 沈岩, 武彤冉, 闫静, 等. 基于 COPERT 模型北京市机动车大气污染物和二氧化碳排放研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11 (6): 1075-1082.
SHEN Yan, WU Tong-ran, YAN Jing, et al. Investigation on Air Pollutants and Carbon Dioxide Emissions from Motor Vehicles in Beijing Based on COPERT Model [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11 (6): 1075-1082.
- [25] 王雪然, 刘文峰, 张龙文, 等. 基于能源链的纯电动公交车全生命周期 CO₂ 减排效果研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19 (1): 19-25.
- WANG Xue-ran, LIU Wen-feng, ZHANG Long-wen, et al. CO₂ Emission Reduction Effect of Electric Bus Based on Energy Chain in Life Cycle [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19 (1): 19-25.
- [26] 朱长征. 基于协整分析的我国交通运输业碳排放影响因素研究 [J]. *公路交通科技*, 2015, 32 (1): 153-158.
ZHU Chang-zheng. Study on Influencing Factors of Carbon Emission in Transport Industry Based on Cointegration Analysis [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32 (1): 153-158.
- [27] 毛保华, 卢霞, 黄俊生, 等. 碳中和目标下氢能源在我国运输业中的发展路径 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21 (6): 234-243.
MAO Bao-hua, LU Xia, HUANG Jun-sheng, et al. On Development Path of Hydrogen Energy Technology in China's Transportation System under Carbon Neutrality Goal [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21 (6): 234-243.
- [28] U. S. Department of Energy. International Energy Outlook 2019 with Projections to 2050 [R]. Washington, D. C.: U. S. Energy Information Administration, 2019.
- [29] PENG T D, OU X M, YAN X Y. Development and Application of an Electric Vehicles Life-cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions Analysis Model [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 131: 699-708.
- ~~~~~
- (上接第 170 页)
- DAI Zhuang, CHEN Xi, MA Xiao-lei. Semi-autonomous Driving Bus Platooning and Scheduling Optimization [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46 (12): 93-101.
- [17] CAO Z C, CEDER A, ZHANG L. Real-time Schedule Adjustments for Autonomous Public Transport Vehicles [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 109: 60-78.
- [18] NAGY V, HORVATH B. The Effects of Autonomous Buses to Vehicle Scheduling System [J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 170: 235-240.
- [19] KANG L J, CHEN S K, MENG Q. Bus and Driver Scheduling with Mealtime Windows for a Single Public Bus Route [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 101: 145-160.
- [20] 陈仕军, 许继影, 周伟刚, 等. 基于逐次确定换班机会集的乘务调度列生成方法 [J]. *计算机集成制造系*
- 统, 2017, 23 (1): 93-103.
- CHEN Shi-jun, XU Ji-ying, ZHOU Wei-gang, et al. Column Generation Approach for Crew Scheduling Problem Based on Iteratively Fixing Relief Opportunities [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23 (1): 93-103.
- [21] 彭琨琨, 沈吟东. 变邻域搜索求解公共交通乘务调度问题 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17 (1): 164-170.
PENG Kui-kui, SHEN Yin-dong. Variable Neighbourhood Search for Public Transport Crew Scheduling [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17 (1): 164-170.
- [22] 沈吟东, 钱壮, 李媛媛. 公共交通驾驶员调度研究综述 [J]. *运筹学学报*, 2021, 25 (1): 1-16.
SHEN Yin-dong, QIAN Zhuang, LI Yuan-yuan. A Survey on Driver Scheduling in Public Transportation [J]. *Operations Research Transactions*, 2021, 25 (1): 1-16.