

基于中国一线典型城市出行特征的 PHEV 碳排放分析

郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高

1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084;
2. 清华大学中国车用能源研究中心, 北京 100084;
3. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100084

[摘要] 中国电网高火电比例与 PHEV 驱动能源的复杂性使得 PHEV 碳排放的研究较为复杂, 现有研究缺乏基于实际 PHEV 运行数据的分析而导致计算结果不够准确。为准确评估中国典型一线城市典型 PHEV 的碳排放水平并分析不同使用行为下碳减排潜力, 基于上海市 50 辆 PHEV70、累计行驶里程为 13 万公里的出行特征, 从车用能源生产和使用过程视角, 研究不同续驶里程、不同充电频率的 PHEV 车辆的碳排放水平, 并与混合动力汽车 (HEV) 和传统内燃机汽车 (ICE) 的碳排放水平进行比较。研究过程中, 通过对海量 PHEV 监控数据进行清洗、切割, 获得使用里程和电池荷电状态 (SOC), 据此计算纯电里程比例; 结合电力和汽油在能源从生产到使用环节的碳排放水平, 计算得到不同续驶里程 PHEV 车辆能源生产到使用全过程中不同充电频率下的碳排放水平。结果表明: 上海市 PHEV70 车辆平均碳排放为 155g/km, 电里程排放为 71g/km, 油里程碳排放为 84g/km, 比 HEV 和 ICE 的碳排放分别降低 5%和 16%; PHEV 碳排放随着充电频率、续驶里程的增加而减少, 每天多次充电相对平均充电频率碳排放水平可改善 4.0%; 综合考虑碳排放与边际收益, PHEV 最佳续驶里程为 100km, 相比 PHEV50 碳排放可改善 4%; 因此可以通过适当增长 PHEV 续驶里程至 100km 左右实现与提高充电频率同样的碳减排水平。

关键词: PHEV; 碳排放; 出行特征

An Analysis of the Carbon Emission of PHEV Based on Travelling Pattern in China Mega Cities

Hao, Xu, Wang, Hewu & Li, Weifeng, Ouyang, Minggao

1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084;
2. China Automotive Energy Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084;
3. Collaborative Innovation Center for Electric Vehicles, Beijing 100084.

*国家重点研发计划 (编号2018YFB0106404) 资助。

原稿收到日期为××××年××月××日, 修改稿收到日期为××××年××月××日。

[Abstract]

The high thermal power ratio in China's power grid and the complexity of PHEV driven energy make the study of PHEV's carbon emissions complicated. The existing researches lack the analysis based on the actual PHEV driving data, which leads to inaccurate calculation results. This paper aims to accurately assess the carbon emission levels of PHEVs in typical mega cities in China and to analyze the potential for carbon reduction under different driving patterns. This study investigated the carbon emission levels of PHEV vehicles with different driving range and charging frequency from the perspective of the automotive energy production and use processes. Study is based on the characteristics of Shanghai's 50 PHEV70 and cumulative mileage of 130,000 kilometers, and the carbon emission levels of PHEV, HEV and ICE are compared. As for the method, distribution of driving range and battery state of charge (SOC) was achieved by cleaning and cutting the PHEV monitoring big data. Based on this, electric drive ratio was calculated. Combining the carbon emission levels of electricity and gasoline in the energy production to the use, the carbon emission levels of different driving frequency and electric vehicle driven mileage and oil-driven mileage at different charging frequencies can be calculated during the energy production of PHEV vehicles of different driving ranges. Carbon emissions of PHEV vehicles with different driving ranges at different charging frequencies can be derived combining the carbon emissions of electricity and gasoline from energy production to use. The result shows that the average carbon emissions of PHEV70 vehicles in Shanghai are 155 g/km, including 71 g/km for electric distance and 84 g/km fuel distance, which is 5 % and 16 % lower than those of HEV and ICE respectively. PHEV carbon emissions decreases with the increase of charging frequency and driving range, the carbon emission of charging more than once a day can be improved by 4.0 % over the average charging frequency. Considering carbon emission and marginal revenue comprehensively, the optimal driving range of PHEV is 100 km, which is 4 % lower than that of PHEV50. Therefore, increasing the PHEV driving range to 100 km is possible to achieve emission reduction level similar to that provided by the carbon effect of increasing the charging frequency.

Keywords: PHEV; Carbon Emission; Travel Pattern;

前言

作为电动车（EV）市场的重要组成部分之一，插电式混合动力乘用车（PHEV）近年来发展迅速。根据 EVI 的数据显示，2015 年全球 PHEV 保有量为 51.7 万辆，占 EV 市场 41.56%。在美国、加拿大、挪威、瑞典、英国、德国等国家和地区，2015-2016 年 PHEV 市场年度增长率比 BEV 市场更高（70%vs 22%，147%vs19%，164%vs6%，86%vs0%，42%vs4%，20%vs-6%）。[1]在中国，2017 年 PHEV 销量为 10.7 万辆，增长率达 47.5%，占 EV 市场的 19.2%。[2]

PHEV 的普及使车辆的碳排放来源由化石燃料转向电网电能，因而车辆使用环节的碳排放迅速降低；但仍存在两个问题：第一，我国电网具

有高火电比例的特征，在电力生产环节同样可能造成高碳排放水平；第二，PHEV 既可以直接使用电能驱动车辆，又可以使用燃油驱动车辆，实际使用能效和碳排放受运行工况、行驶距离、驾驶习惯、充电习惯等多因素影响，个体性差异较大。因此，有必要综合考虑车用能源生产和车辆使用环节对 PHEV 实际碳排放的影响并进行全面研究。

引入电力生产环节分析 PHEV 的碳排放情况是一种常用的分析方法[3, 4, 5]。但是，相关研究缺乏 PHEV 的实际行驶数据，利用传统车实际行驶里程计算针对不同续驶里程 PHEV 的电里比例，也即效用因子 Utility Factor (UF) 后全面计算能源生产 (WTP) 和车辆使用 (PTW) 两个环节的能耗与其带来的碳排放，结果表明电动汽车对碳减排有巨大优势[6]。但由于 PHEV 实际行驶

过程中运行工况、车主驾驶习惯及充电习惯的不同,使用传统车对 PHEV 进行估算可能与实际 PHEV 的耗电与油耗存在较大差异。因此有必要基于实际 PHEV 运行数据及出行特征开展相关的碳排放研究。

为准确评估中国典型一线城市典型 PHEV 的碳排放水平,明确基于实际出行特征下 PHEV 碳减排潜力,本文基于上海市 50 辆 PHEV70、累计行驶里程为 13 万公里的实际出行特征,通过对海量 PHEV 监控数据进行清洗、切割,获得使用里程和电池荷电状态(SOC),据此计算纯电驱动里程比例;结合电力和汽油在能源从生产到使用环节的碳排放水平,比较不同续驶里程 PHEV 车辆能源生产到使用全过程中,在不同充电频率下的碳排放水平。

1 研究方法

1.1 数据采集与处理

研究基于监控平台采集的海量 PHEV 真实运行数据进行,受益于 PHEV 的市场化推广,目前我国已积累丰富的 PHEV 车辆实际行驶数据,这使得计算 PHEV 实际碳排放成为可能。北京市交通研究院、上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心等单位使用调查问卷对中国多个城市新能源汽车车主进行调研发现,上海市的 PHEV 日均出行里程为 27.9km,成都市为 36.2km,临沂为 45.4km[7]。2014 年后新能源汽车数据采集逐渐平台化、规范化,通过直接对 PHEV 车辆行驶数据进行采集可以得到更为准确的 PHEV 行驶里程,甚至可基于更为丰富的电池数据,分离电驱动里程和油驱动里程,从而分别计算碳排放。上海市数据中心 [3]、北京电动车监控服务平台(BEVMSC) [8]等地方性平台均可提供基于监控数据的 PHEV 车辆行驶里程数据。

数据预处理包括数据转化和数据清洗,数据转化需要将数据传输格式转化为通用的 24 小时时间制,并针对数据传输过程中可能出现的先后顺序颠倒进行时间顺序调整;数据清洗主要过滤掉由于数据传输丢失或数据溢出造成的缺失点。再对数据进行切分,停车时间超过 30 分钟的两个相邻数据点被切分为两次出行,进一步清洗掉出行时间小于 5 分钟或者出行里程小于 1km 的

个别点以避免个别值偏差;同时根据我国高速公路 120km 的限速及连续行车 4 小时,必须停车休息 20 分钟以上的法规规定, [9] 单次出行在 480km 以上的数据也予以删除。出发时间在同一天的出行被定义为同一天出行,将同一天出行的多次出行里程相加得到日出行里程。

初始数据采集中往往不包含充电状态及停车时 SOC 数据,因此根据 SOC 与运行数据进行充电行为的划分。界定相邻两次出行间隔超过 30 分钟小于 2 天且 SOC 上升幅度超过 10% 时为 1 次充电行为。本文中关于一天两次充电的定义为相邻两次充电行为发生在 24h 以内,每日一次充电的定义为相邻两次充电行为发生在 24-48h 以内,以此类推。

1.2 纯电里程比例

纯电里程比例可分为理论值与实际值。

纯电里程比例理论值可直接根据日均出行里程分布计算得到。在假设每天充一次电且每天第一次出行时 SOC 为 100% 的条件下,纯电里程比例可表示为每日出行里程分布的函数,也即效用因子 Utility Factor (UF):

$$UF(R_{CD}) = \frac{\sum d_k \min(d_k, R_{CD})}{\sum d_k} \quad (1)$$

其中,

R_{CD} 为 PHEV 续驶里程;

d_k 为第 k 日的日出行里程,在这里 k 为全部日出行里程数据。

针对不同续驶里程 PHEV 可以得到不同的纯电里程比例理论值。

纯电里程比例实际值主要基于车辆 SOC 进行分析。SOC 下降代表电池放电,在车辆行驶过程中 SOC 上升代表发动机为电池充电过程。实际行驶过程中,只有电能来源于电网且 SOC 下降的过程才被定义为纯电驱动里程,表征为每次充电结束后第一次经过每个 SOC 数值时累计的里程。

使用纯电里程比例实际值可以校正理论值。纯电动里程实际值针对某一特定续驶里程 PHEV 提供准确数值,根据续驶里程为 X 的 PHEV 的纯电里程比例的理论值与实际值的差别按比例可校正其他续驶里程 PHEV 的理论值。在后续公式中,统一用 UF 表征纯电里程比例。

1.3 车辆能量消耗

我国对 PHEV 车辆能耗测试方法目前仍采纳

《轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法》(GB/T 19753-2013), 其中关于 PHEV 能耗测试分为 A 条件储能装置通过车辆行驶放电至发动机自行启动和 B 条件以最低储能状态进行工况循环测试, 分别根据测试结果得到燃料消耗量的加权平均值:

$$C = \frac{D_e \times c_1 + D_{av} \times c_2}{D_e + D_{av}} \quad (2)$$

其中,

C 为燃料消耗量, 单位为升每百千米;

c_1 为条件 A 试验中所得燃油消耗量, 单位为升每百千米, 针对 PHEV 为 0;

c_2 条件 A 试验中所得燃油消耗量, 单位为升每百千米, 对应上述非纯电驱动里程油耗;

D_e 为纯电动续驶里程, 单位为千米;

D_{av} 为 25km, 是假设的储能装置两次充电之间的平均行驶里程。[10]

已知每一车型车辆均会公示公示值为 C 和 D_e , 因此根据该式可以得到 c_2 , 也即非纯电驱动里程油耗:

$$FC = c_2 = \frac{C \times (D_e + D_{av}) - D_e \times c_1}{D_{av}} \quad (3)$$

同时, 根据车辆公示值 D_e 和电池容量 Q , 可以估算车辆电耗, 单位为千瓦时每百千米 (kWh/100km):

$$EC = \frac{Q}{D_e} \times 100 \quad (4)$$

1.4 能源生产与车辆使用环节的碳排放计算

基于电里程比例可以计算包含能源生产与车辆使用环节的 PHEV 的每公里碳排放水平。衡量碳排放的单位为每行驶 1km 产生的二氧化碳当量。PHEV 的碳排放包括电里程碳排放和油里程碳排放, 均包括能源的生产和车用能源使用两个环节。针对每公里的碳排放:

$$CO_{2E} = UF \times EC \times CO_{2e} \times 10 \quad (5)$$

$$CO_{2F} = (1 - UF) \times FC \times CO_{2f} \times 10 \quad (6)$$

其中,

CO_{2E} 为每公里电里程碳排放, 单位为 g/km;

CO_{2F} 为每公里油里程碳排放, 单位为 g/km;

CO_{2e} 电动汽车每度电的碳排放强度, 单位为

kg/kWh;

CO_{2f} 为每升汽油的碳排放强度, 单位为 kg/L。

2 主要研究结果

2.1 出行特征

2.1.1 出行里程

本次研究收集 50 辆整备质量为 1750kg 的 PHEV70 轿车在中国典型的一线城市——上海从 2014.4 至 2014.12 共计 8 个月的行驶数据, 数据主要包括 GPS 数据和电池 SOC 数据, 共计 13.8 万公里。本次数据可被划分为 8096 次出行, 分布于 4168 车天中, 平均单日出行 1.9 次; 共包含 1901 次充电行为, 平均充电频率为 2.2 天一充。单日出行里程集中分布在 50km 以内, 平均单日出行里程为 33.15km, 超过 85% 的出行天数少于 70km。

由于消费者充电便利程度的不同, 消费者充电频率明显不同。其中每天充电超过一次的车天数比例占到了 27.67%, 每天充一次电的比例占到了 29.74%, 每两天充一次电的比例为 14.32%, 而以更低频率充电的比例占到了 28.27%。

图 1 给出了每日出行里程累计分布概率随日出行里程的变化情况。考虑到 PHEV 对充电行为的敏感性, 将单日出行里程按照充电频率进一步划分, 随着日出行里程的增加, 累计分布概率从 0 到 1 的增速降低, 平均的单日出行里程越长, 累计分布曲线在短里程部分增加越缓, 在长里程部分增加越迅速。对应的单日充电频率越高, 日均单日出行里程也越长: 两天充一次电时日均出行里程为 37.60km; 每日一次充电时日均出行里程为 40.55km, 而一天充两次电时每日日均出行里程约为 50.05km。这是由于消费者有较长出行计划时, 会优先通过增加充电频率来满足长里程出行需求。

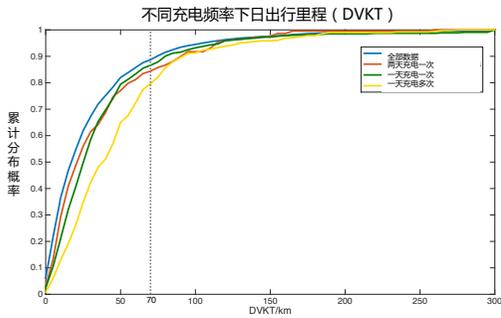


图 1 不同充电频率下日出行里程

2.1.2 纯电里程比例

使用 SOC 分析得到的平均实际纯电里程比例为 0.53，随着充电频率的减小，实际纯电里程比例减小，如图 2 所示。每天充多次电的情况下，实际纯电里程比例为 0.66；每天充一次电的情况下，实际纯电里程比例为 0.62；每两天充一次电的情况下，实际电里程比例为 0.55。

与单日平均出行里程结合，可以进一步得到具体电驱动里程与燃油驱动里程（图 2）。每日平均电驱动里程为 17.6km，与充电频率相关度很高，每天充电一次以上时电驱动里程为 33.0km，每天充电一次的电驱动里程为 25.1km，两天充电一次时电驱动里程为 22.9km；而油里程相对更加稳定，随着充电频率增加分别为 17.0km，15.4km，14.7km，与平均的 15.6km 相差不大。

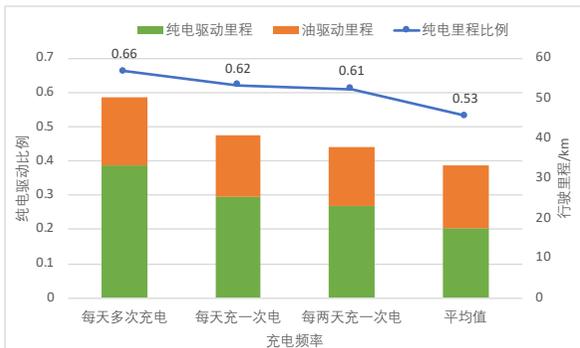


图 2 随充电频率变化纯电驱动里程比例的变化情况

使用 PHEV70 在每天充一次电的条件下的实际纯电里程比例 (0.62) 修正各续驶里程下理论纯电里程比例，续驶里程从 10 增加到 150km 是时，纯电里程比例从 0.18 增加到 0.76，且增速随续驶里程增加而降低；其中 PHEV50 约为 0.53，

PHEV90 约为 0.68。

2.2 车辆能量消耗

根据该 PHEV70 车型公示综合能耗 1.6L/100km 与 70km 续驶里程，可以得到 FC 为 6.08L/100km，进一步根据电池容量 13kWh，EC 为 18.57kWh/100km。

2.3 燃料生产

2.3.1 电能

火力发电是我国的主要发电形式，从结构看，中国火电在总装机容量与发电量中占比高，在满足能源电力需求上发挥了重要作用，燃煤发电长期占据总装机容量和总发电量的七成左右比例，2016 年我国发电量 6.02 万亿千瓦时，其中火电比例超过 4 万亿千瓦时。[11]。这一比例保持逐年下降趋势，从 2006-2016 年，火电发电量从 2006-2007 年的最高点 83.3%，下降到 2015 年的 73.1%，2016 年的 66%。[12]虽然近十年可再生能源发电迅猛增长，但煤电仍然是中国电力供应的主力电源和基础电源。

据中电联初步统计分析，2016 年全国单位火电发电量二氧化碳排放约 822g/kWh，比 2005 年下降了 21.6%。由于可再生能源对碳排放的改善，电网综合碳排放强度为 0.61kg/kWh。进一步考虑 6.5% 的输电损失，我国电力的全生命周期二氧化碳排放强度为 0.65 kg/kWh。考虑充电环节损失，如果按损耗最大的快充 (10%) 计算，我国电力的全生命周期二氧化碳排放强度为 0.72 kg/kWh，这就是 2016 年电动汽车用电的碳排放强度。如果未来普遍采用可再生能源发电，碳排放强度有望降至 0.05kg/kWh。

2.3.2 燃油

对于传统的车用燃料，1 升汽油燃烧的二氧化碳是 2.3kg。汽油标号一般是以正辛烷的含量来标定的，正辛烷含量越高，汽油的标号越高，汽油分子量在 90~120 之间，因此可以根据方程式 $2C_8H_{18}+25O_2=16CO_2+18H_2O$ 来计算。而汽油密度一般为 730g/L，根据方程式守恒，730g 汽油完全燃烧排放的 CO2 质量为 $0.73 \times (44 \times 16) \div (114 \times 2) = 2.3kg$ 。

对中国燃油从生产到使用 (WTW) 的全生命周期碳排放，综合当前的研究结果 [3, 13-18]，随着能量效率的提升，汽油与柴油的全生命周期

碳排放从 2008 年略有下降，对中国汽油和柴油生产环节的温室气体排放：汽油生命周期碳排放为 2.95 kg/L（其中燃油生产 0.65 kg/L，使用 2.30kg/L）。

2.3 电动车碳排放减排效果

根据 PHEV 电里程比例可以得到不同续驶里程 PHEV 的每公里碳排放水平，对于 PHEV70，平均碳排放为 155g/km，电里程排放为 71g/km，油里程碳排放为 84g/km，如图 3 所示。

与 HEV 和 ICE 相比，PHEV 的碳排放水平分别低 5%和 16%。工信部综合油耗为 5.5L/100km 的 HEV 的碳排放为 162g/km，6.9L/100km 的传统车碳排放为 179g/km，分别比 PHEV70 的平均碳排放水平高出 7g/km 和 24g/km。如果可以采用可再生能源发电，PHEV 的电里程的碳排放可大幅度降低至 5g/km 左右，其综合碳排放主要决定于油里程碳排放，从而每行驶 1km，随着充电频率增加，PHEV 比 HEV 和 ICE 分别少排放 73 ~ 95g 和 90 ~ 112g。

随着充电频率增加，PHEV 碳排放降低。每两天充一次电的碳排放为 152g/km，每天多次充电的碳排放为 149g/km，相对平均碳排放水平可改善 4.0%。其主要原因是充电频率增加，电里程比例增加，由于 2016 年电网结构下我国的电网 4.1 度电的发电二氧化碳排放相当于 1 升汽油的二氧化碳排放，因此当电耗增加低于汽油车油耗的 4.1 倍时，电动车碳排放降低。

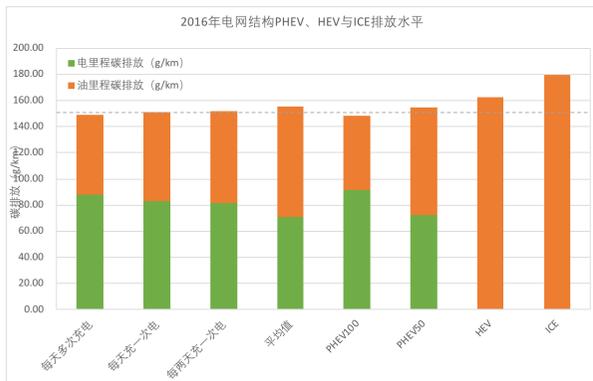


图 3 2016 年电网结构 PHEV 碳排放水平

随着 PHEV 续驶里程从 0 增加到 150km，碳排放从 180g/km 降低到 145g/km，如图 4 所示。在每天充一次电的充电频率下，PHEV70 的碳排放 151g/km，其中电里程碳排放为 83 g/km，油里程

碳排放为 68 g/km。PHEV50 的碳排放为 155g/km，PHEV100 的碳排放为 148g/km，PHEV100 相比 PHEV70 碳排放改善 2%，相对 PHEV50 改善 4%。

随着续驶里程增加碳排放降低的边际收益递减，续驶里程从 0 增加到 150km，每增加 10km，碳排放降低的数值从 8.2g/km 降低至 0.4g/km，续驶里程在 100km 以上时，碳排放降低的数值低于 1(g/km)/10km。主要原因是 PHEV 出行集中在短里程。考虑到续驶里程增加所需要的电池容量增加带来的额外碳排放，从优化碳排放的角度而言，100km 为 PHEV 最佳续驶里程。

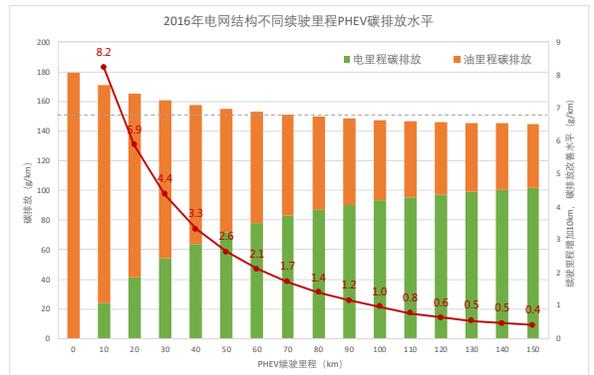


图 4 2016 年电网结构下不同续驶里程 PHEV 碳排放水平

对比 PHEV 碳排放随续驶里程、充电频率变化的规律，可以发现，在每天充一次电条件下的 PHEV50 的碳排放与实际充电行为的 PHEV70 的碳排放数值接近（154.89g/km 与 155.16g/km），每天充一次电条件下的 PHEV100 的碳排放与每天多次充电的 PHEV70 的碳排放数值接近，甚至优于后者（147.52g/km 与 149.23g/km）。考虑到我国大规模增加固定充电桩受到人口密度等客观条件限制，在无法进一步提高充电频率的情况下，可以适当增长 PHEV 续驶里程至 100km 左右实现同样的碳减排水平。

5 结论

本文基于上海市 50 辆 PHEV70、累计行驶里程为 13 万公里的出行特征，从车用能源生产和使用过程视角，研究不同续驶里程、不同充电频率下 PHEV 车辆的碳排放水平情况，并分析基于实际出行特征下 PHEV 碳减排潜力，得出以下结论：

- 充电频率增加或续驶里程增加，电驱动里程比例可从 0.53 增加至 0.68。
- 与 HEV 和 ICE 相比，PHEV 的碳排放水平分别低 5% 和 16%。
- 随着充电频率从两天充一次电增加到每天多次充电，PHEV 碳排放可降低 4%。
- 随着 PHEV 续驶里程从 50km 增加至 100km，碳排放降低 4%；且随着续驶里程增加碳排放降低的边际收益递减。
- 考虑到我国大规模增加固定充电桩受到人口密度等客观条件限制，在无法进一步提高充电频率的情况下，可以适当增长 PHEV 续驶里程至 100km 左右实现同样的碳减排水平。

致谢: 感谢上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心对本研究提供的支持!

参考文献

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global EV Outlook 2017 Two million and counting[R]. International Energy Agency, 2017.
- [2] 王贺武. 中国节能与新能源汽车产业数据库[J].
- [3] LI X, OU X, ZHANG X 等. Life-cycle fossil energy consumption and greenhouse gas emission intensity of dominant secondary energy pathways of China in 2010[J]. Energy, 2013, 50: 15 - 23.
- [4] LIN G, WINFIELD Z C. Life Cycle Assessment of Environmental and Economic Impacts of Advanced Vehicles[J]. Energies, 2012, 5(3): 605-620.
- [5] XIE X, ZHANG T, HUANG Z. Life Cycle Assessment of Energy Use and GHG Emissions of Plug-In Hybrid Electric Vehicles in China[C]//SAE 2013 World Congress & Exhibition. 2013.
- [6] WANG H, ZHANG X, OUYANG M. Energy and environmental life-cycle assessment of passenger car electrification based on Beijing driving patterns[J]. Science China Technological Sciences, 2015: 1-10.
- [7] 上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心. 上海市新能源汽车产业大数据研究报告(2017)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
- [8] ZOU Y, WEI S, SUN F 等. Large-scale deployment of electric taxis in Beijing: A real-world analysis[J]. Energy, 2016, 100: 25 - 39.
- [9] 中华人民共和国道路交通安全法[J]. 维基百科, 自由的百科全书, 2016.
- [10] 中国汽车技术研究中心, 重庆长安新能源汽车有限公司, 东风电动车辆股份有限公司等. GB/T 19753-2013, 轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法[S]. GB/T 19753-2013.
- [11] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国III、IV阶段)[S]. GB18352.3-2005.
- [12] 杨倩鹏, 林伟杰, 王月明等. 火力发电产业发展与前沿技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2017(13): 3787 - 3794.
- [13] HUO H, CAI H, ZHANG Q 等. Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between China and the U.S[J]. Atmospheric Environment, 2015, 108: 107 - 116.
- [14] OU X, ZHANG X, CHANG S. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations[J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 406-418.
- [15] 欧训民, 张希良, 常世彦. 多种新能源公交车能耗与主要污染物排放全生命周期对比分析[J]. 汽车与配件, 2008(52): 16 - 20.
- [16] OU X, YAN X, ZHANG X 等. Life-cycle analysis on energy consumption and GHG emission intensities of alternative vehicle fuels in China[J]. Applied Energy, 2012, 90(1): 218 - 224.
- [17] ZHOU G, OU X, ZHANG X. Development of electric vehicles use in China: A study from the perspective of life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions[J]. Energy Policy, 2013, 59: 875-884.
- [18] WANG HE WU;ZHANG XIAO BIN;OUYANG MING GAO; Energy and environmental life-cycle assessment of passenger car electrification based on Beijing driving patterns[J]. Science China(Technological Sciences), 2015(04): 659-668.

