

DOI: 10.5846/stxb201801060040

应紫敏, 吴旭, 杨武. 杭州市公交车油改电项目碳排放效益核算. 生态学报, 2018, 38(18): - .

Ying Z M, Wu X, Yang W. Carbon emission accounting for the transition of public buses from gasoline to electricity in Hangzhou City, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

杭州市公交车油改电项目碳排放效益核算

应紫敏¹, 吴旭^{2,3}, 杨武^{1,*}

1 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058

2 浙江省经济信息中心, 杭州 310006

3 浙江大学经济学院, 杭州 310058

摘要:以减少碳排放为核心的应对气候变化行动已成为全球趋势, 中国政府积极践行减少碳排放的国际承诺, 出台多项鼓励新能源的政策措施, 其中包括对新能源产业的补偿以及将汽油燃料汽车改装为电动汽车。但是这些政策的实施效果并不太清楚。举例来说, 煤电为主的供电类型极大削弱了碳减排的效果, 充电桩等配套基础设施建设和旧车报废等过程还会产生额外碳排放, 不同城市之间的这些情况差别较大。因此, 城市层面生命周期尺度上的电动车碳减排效果尚未明确。本文基于生命周期理论, 以杭州市为例, 在构建公交车生命周期模型下分别核算纯电动和柴油车生命周期碳排放量, 并在基准情景、低碳情景和强化低碳情景下进行公交车油改电碳排模拟。研究结果表明: (1) 杭州市单辆纯电动和柴油公交车生命周期 CO₂ 排放量分别为 1103.237t 和 1401.319t, 减排比例达 21.27%。其中, 电力生产约占纯电动车生命周期碳排量 74.10%, 柴油生产与消耗约占柴油车生命周期碳排量 86.96%; (2) 目前杭州市在营运的 2312 辆纯电动公交车生命周期内 (13 年) 碳减排总量约达到 68.917 万 t, 年均 5.301 万 t; (3) 在油改电过程中, 纯电动公交车需运行约 3.5 年后才能相对柴油公交车真正起到碳减排效果; (4) 在不同新煤电技术及能源结构优化下, 2020、2035 和 2050 年杭州市公交车油改电项目每辆车碳减排量将达到 354.071—884.339t, 年均 27.236—68.026t, 减排比例 25.27%—63.11%, 且 2050 年强化情景下纯公交车生命周期碳排量仅为当前纯电动公交车和柴油公交车的 46.86% 和 36.89%, 潜在碳减排效益显著。

关键词: 能源政策; 纯电动公交车; 生命周期评估; 节能减排; 碳排放; 情景分析

Carbon emission accounting for the transition of public buses from gasoline to electricity in Hangzhou City, China

YING Zimin¹, WU Xu^{2,3}, YANG Wu^{1,*}

1 College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2 Zhejiang Provincial Development and Reform Commission, Zhejiang Economy and Information Center, Hangzhou 310006, China

3 College of Economics, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: As global climate change worsens, the goal of reducing carbon emissions has become a global consensus. The Chinese government has already taken a series of active policy measures to reduce carbon emissions, including compensation for new energy industries and for converting gasoline-fueled vehicles to electric vehicles. Electric vehicles are gradually becoming a viable alternative to gasoline-fueled vehicles, owing to their greater efficiency and lower pollution, including lower carbon emissions. However, empirical evidence of the environmental effects of such policy measures remains unclear. For example, the coal-based grid energy structure of China may largely offset the effectiveness of carbon emission reduction policies. Meanwhile, the construction of basic ancillary facilities (e.g., the construction of charging piles, and the

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0503404); 国家自然科学基金 (71673247); 浙江省杰出青年基金 (LR18D010001)

收稿日期: 2018-01-06; **修订日期:** 2018-04-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyang@zju.edu.cn

scrapping or recycling of old vehicles) also introduce additional carbon emission and other environmental costs, which further reduce the effectiveness of carbon emission reduction policies. As a result, at the life-cycle scale, the effect of carbon emission reduction of electric vehicles is still controversial. We systematically assessed the carbon emissions of electric and diesel-fueled buses using the life-cycle assessment method and Hangzhou City as an example, and then simulated the carbon emissions of the buses under baseline, low-carbon, and strengthened low-carbon scenarios. Our results show that: (1) At the life-cycle scale, the carbon emissions of each electric and diesel bus were 1103.237 and 1401.319 t CO₂ eq, respectively, of which electricity production and fuel combustion accounted for 74.10 and 86.96%; (2) For the currently operating 2312 electric buses in Hangzhou, the total reduction in carbon emissions at the full life-cycle (13 years) is $\sim 0.689 \times 10^6$ tons, or an average of 53.013×10^3 tons per year; (3) It takes ~ 3.5 years before the total net carbon emissions of electric buses to be less than those of diesel buses; (4) For the switch of diesel buses to electric buses program at Hangzhou City, under different development of new coal technologies and improvement of energy structure scenarios, in the years of 2020, 2035, and 2050, the reduction of carbon emission of single electric bus at Hangzhou is expected to reach 354.071—884.339 ts, with an annual reduction of 27.236 (25.27%) to 68.026 t (63.11%). Particularly, under the strengthened low-carbon scenario in 2050, the life-cycle carbon emissions of electric buses will be only 46.86 and 36.89% that of current electric and diesel buses, respectively. The results of our quantitative study suggest that, at the life-cycle scale, switching from diesel buses to electric buses can provide an appealing reduction in carbon emissions.

Key Words: energy policy; pure electric bus; life cycle assessment; energy saving and emission reduction; carbon emission; scenario analysis

由温室气体(Greenhouse Gas, GHG)大量排放导致的气候变化已成为全球关注的焦点。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告中明确指出:“1983—2012年是过去1400年来最热的30年。20世纪末期全球平均地表变暖主要取决于累积的CO₂排放^[1]。”2013年人源碳排放量达360亿t,其中中国占29%,碳排放总量已超过美欧总和^[2]。中国碳排放量的激增主要来源于工厂^[3]和发电厂^[4],而交通运输行业^[5]正成为不断增大的排放源之一。例如电力生产过程中化石燃料燃烧产生的CO₂约占到人类活动碳排放量24%^[6],鉴于我国以煤炭为主的能源结构以及利用效率等情况,我国电力实际碳排放量约占全国总排量的40%^[7]。

2015年,我国在《巴黎协定》中承诺到2030年实现单位GDP的CO₂排放较2005年下降60%—65%,非化石能源消费占能源消费总量占比达到20%左右的目标^[8]。在碳减排背景下,我国各级政府出台多项鼓励新能源的政策。科技部在2009年推出“十城千辆”目标,被选中城市将开展示范运行约1000辆新能源汽车^[9]。2012年我国制定《节能与新能源汽车产业发展规划》^[10]提出:“我国将以纯电动汽车为主要战略方向,并计划到2020年新能源汽车占到50%”。2015年1月,浙江省提出对杭州市和宁波市的低碳公交等进行主体性试点项目^[11]。同年12月,在《关于印发浙江省创建国家清洁能源示范省行动计划(2016—2017年)的通知》^[12]中指出:“积极推广电动汽车,2016年和2017年分别增加7500辆以上电动汽车。”杭州市公交集团从2008年就开始应用油电混合动力客车、纯电动客车多元化等提升公交绿色环保性能。截至2017年4月,杭州市城区共有公交车4974辆,各类清洁能源、节能与新能源车辆比例达到95.94%。其中混合动力公交车共计856辆,占全部公交车的17.21%,纯电动公交车共计2312辆,占全部公交车的46.48%,其中比亚迪有1820辆,上汽万向有400多辆,长江有14辆,比亚迪占纯电动客车总数的78.72%。

20世纪90年代以来,国内外陆续开展关于新能源汽车(纯电动汽车、天然气汽车和混合动力汽车等)替代传统燃油汽车的碳排放效益分析研究。当前,车辆碳排放研究主要通过美国阿贡实验室的GREET(greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation)软件和清华大学的Tsinghua-LCAM(Tsinghua University Life-cycle Analysis Model)模型来进行全生命周期评估(LCA, Life-cycle Assessment)^[13]。在此基础上,研究人员对车辆的不同区域^[14-16]、不同类型^[17-20]、不同燃料^[21-24]、不同生命周期阶段^[23-25]的碳排

放量、能耗和污染物排放量等进行了大量定性和定量研究,已有研究结果表明车辆车型^[16-19]、轻质材料使用情况^[25-26]、车辆实际运行工况^[27-28](包括驾驶方式、实际路况和气候条件等)、公交车运行路线^[29]、电力生产来源和电池充电行为与运行效率^[30]等都会影响纯电动车辆和传统油耗车的碳排放效益比较。当前研究普遍认为车辆油改电后碳减排效益将增加。Arar^[15]的研究表明结合美国电力能源结构计算得到美国乘用车和轻型卡车油改电后碳排放量显著减少,且将在 2020 年碳减排 36%。黎土煜等^[13]通过 GREET 软件,运用 LCA 理论构造车辆相应阶段并结合车型和路况信息构建公交车模型,研究结果表明纯电动公交车替代传统燃油车将使得 CO₂排放量减少 19.7%。王宁^[18]和宋凌璐^[19]利用 GREET 模型分别分析纯电动公交车和电动卡车“油井到车轮”CO₂排放量,并与传统柴油公交车对比后得到碳减排率分别为 20.2%和 5.3%。欧训民等^[31]通过清华 LCAM 模型对在中国背景下使用的插电式混合动力电动汽车和纯电动汽车温室气体排放量进行 LCA 模拟,得到纯电动汽车在 2015 和 2020 年预计碳减排率分别为 28.99%和 40.83%。但也有部分研究认为当前中国不同区域电力背景下车辆油改电后碳减排效益差异较大,部分甚至为负效益。李书华等^[28]指出电动汽车油改电碳排放效益情况和电力产生来源的不确定性等直接相关。康利平^[32]等和宋永华^[33]等的研究认为当前东北、华北区域电力背景和全国平均的电力背景下电动汽车油改电后碳排放增加,而南方和华中地区碳减排效益暂不清楚。从以上现有研究成果可知:虽然当前通过 LCA 理论并借助相应软件对车辆油改电碳排放情况已有不少研究,但鉴于城市相关基础设施、能源结构、车辆类型及分析模型的差异性等导致的车辆油改电后碳减排效益并不一致且具有显著时空差异性,因此深入开展城市层面纯电动公交车与柴油公交车 LCA 碳排放研究对明晰相关地区碳减排政策效益十分必要。本研究针对杭州地区推动公交车纯电动车转型计划具有一定现实意义。本文拟以杭州市柴油公交车改电公交车(简称公交车油改电)政策为例,评估政策在全生命周期下的碳减排效益。具体研究目标包括:(1)在生命周期框架下核算杭州市纯电动和柴油公交车制造、运营维护与报废过程、以及电力与柴油的生产、运输和配送过程中产生的碳排量,通过比较两者差异来评估公交车油改电政策的碳减排效益;(2)根据未来煤电技术和能源结构预测结果,模拟基准、低碳和强化低碳三种情景下全面推行公交车油改电政策的碳减排效益情况。

1 研究方法数据来源

1.1 研究方法

生命周期评价法(Life Cycle Assessment, LCA)是对产品从初始到终结全过程的分析方法,被形象地称为从“摇篮”到“坟墓”的评估。LCA 流程包括原料获取、生产、运输、使用维修和报废回收五部分^[34]。生命周期评价框架一般包括 4 个阶段:目标与边界范围的确定(确定功能单位)、过程清单分析(数据收集与建模)、影响评价(计算)和结果解释^[28,35]。本文采用基于详细过程的生命周期评价方法,通过研究纯电动和柴油公交车从原料生产到报废回收各阶段碳输入和输出情况,核算相关过程碳排量。

1.1.1 确认评估对象、目标与边界

本文评估对象是指被研究的纯电动和柴油公交车,涵盖了从其原材料获取到生命期末尾的报废回收全过程。目标与边界范围的确定主要包括系统边界、功能单位和假设等^[36]。本文所评估的两类公交车具体参数如表 1 所示。两类车主要差异体现在动力系统方面,如图 1 所示,其他部分如资源获取和相近材料碳排系数默认近似相等。

功能单位为公交车行驶 1km。研究边界从车辆材料生产到车辆报废回收过程中涉及到的各碳排放阶段,包括燃料上游阶段(如燃料原料生产与运输和燃料生产与输送)、燃料下游阶段(燃料消耗)、公交车原材料生产与加工(纯电动公交车包括电池系统)、装配与制造、运行、配套设施运营和报废回收。

1.1.2 建立公交车生命周期模型

纯电动和柴油公交车生命周期评估的示意图如图 2 所示。

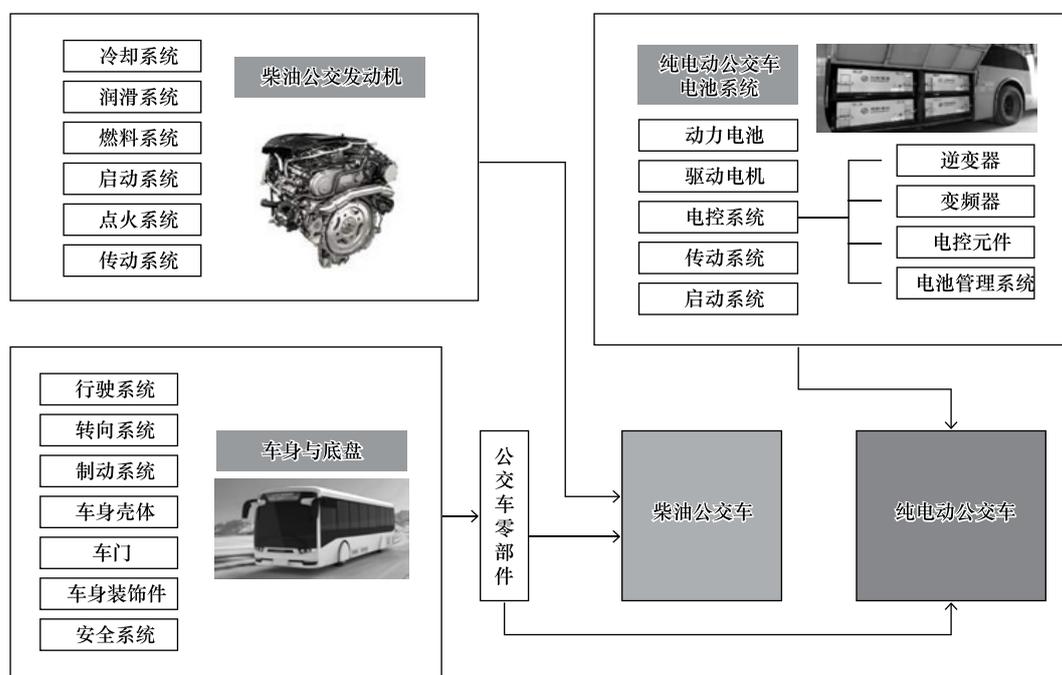


图 1 纯电动公交车和柴油公交车车辆解构图

Fig.1 Deconstruction diagram of pure electric bus and diesel bus

表 1 纯电动公交车和柴油公交车车辆参数^[37-39]

Table 1 Vehicle parameters of pure electric bus and diesel bus^[37-39]

项目 Project	纯电动公交车 Pure electric bus	柴油公交车 Diesel bus
整车质量 Overall vehicle weight	12000kg	13300kg
电机/发动机特征 Motor/Engine features	永磁同步电机	YC6L280-42
轮胎数 Number of tires	6	8
充电/输油效率 Charging/Dispensing efficiency/%	90	100
百公里耗电/油量 Power/Oil consumption per 100 kilometers	120kW · h · (100 km) ⁻¹	40L/100km

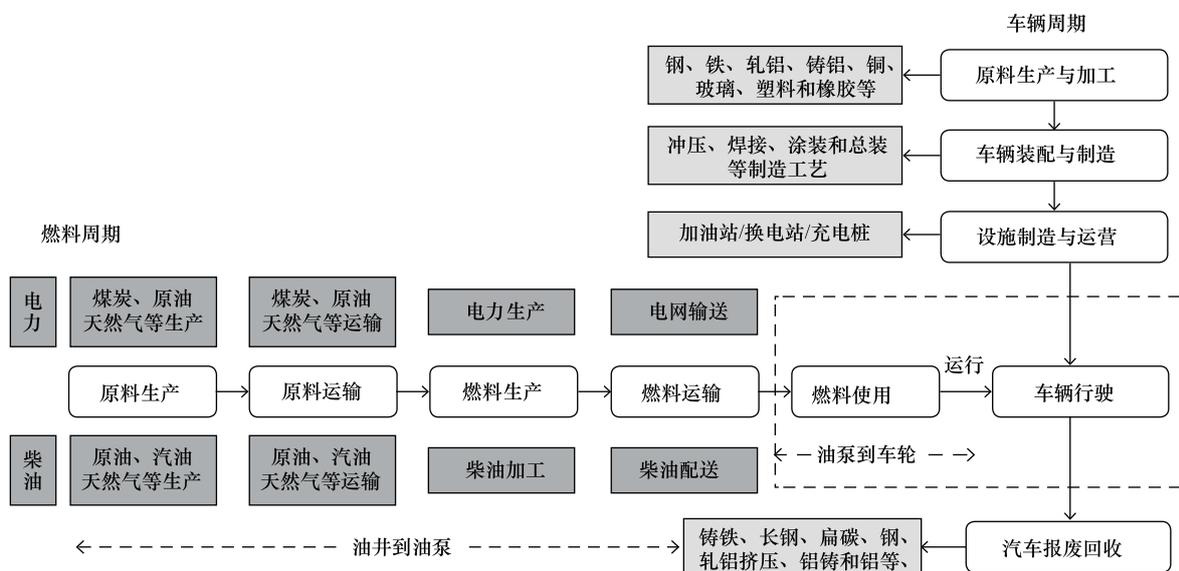


图 2 纯电动公交车和柴油公交车生命周期各阶段

Fig.2 Life cycle assessment of pure electric bus and diesel bus at all stages

(1)燃料周期:燃料生命周期也称井到轮(Wells-to-Wheels, WTW),对井到轮阶段的研究通常细化为井到泵(Well-to-Pump, WTP)也称燃料上游周期和泵到轮(Pump-to-Wheels, PTW)也称燃料下游周期^[40]。本文涉及的燃料包括柴油公交车和纯电动公交车所使用的柴油和电力。柴油上游阶段包括原油开采和运输^[13,28,41]、炼油生产和柴油输送^[29-30]。我国柴油炼油生产阶段每吨消耗 71.629kg 燃料油^[42],生产损耗为 0.5%^[28]。我国柴油生产工厂到柴油补充站总共涉及 8 个环节的损耗,损耗率为 0.27%^[28],电力生命周期碳排放与杭州市电力能源结构紧密相关。电力上游阶段包括原煤开采与生产^[13,28,41,43-45]、电煤运输^[46-48]和其他原料生产与运输^[28,37,43],电网输电线路平均损失率 6.47%^[49]。燃料下游即车辆燃料柴油和电力消耗^[28,40],本文将此过程放置车辆周期运行阶段进行核算,此处不重复核算。

(2)车辆周期:车辆生命周期包括原料生产与加工、装配与制造、车辆运行、设施运营与维护、报废与回收。柴油原料生产与加工阶段包括钢、铁、轧铝、铸铝、铜、玻璃、塑料、橡胶等^[28,46-47,49],而纯电动公交车还需考虑电池。目前市场上电动车电池的循环使用寿命已达到 2000 次或 10 年以上^[10],本文设定其生命周期内将更换一次电池。装配与制造在生产流程上两类车没有太多区别。整车制造涉及冲压、焊接、涂装和总装四大工艺。四大工艺最终通过电力、空气压缩量、水量、蒸汽量、天然气量和循环水量的消耗产生碳排放^[13],本文假设两种公交车装配阶段工艺一致。车辆运行阶段考虑生命周期内柴油和电力消耗。设施运营与维护阶段中柴油公交车涉及基础设施建设和运营,碳排放分别为 0.014g CO₂eq/km 和 0.024g CO₂eq/km^[50],纯电动公交车需新建充电桩和换电站等设施,其中充电桩建设和运营碳排放为 4.74g CO₂eq/km^[51],两阶段碳排放比例分配参照柴油公交车,换电站建设碳排放量参照单位面积建筑碳排放^[52]。维护过程本文将就公交车维护中典型产品轮胎^[53-54]进行核算。一般情况,综合路况下轮胎行驶里程不超过 6 万 km。根据《机动车强制报废标准规定》,公交车使用年限 13 年。柴油公交车和纯电动公交车运行阶段假设每天行驶 200km,生命周期里程约 95 万 km。纯电动公交车耗电量为 120kwh/100km,充电效率为 90%,柴油公交车耗油量为 40L/100km,加油效率本文设定为 100%^[37-39,55],柴油燃烧碳排放量为 2.645kg/L^[42,56]。报废与回收阶段主要有直接同用、翻新回用、材料重熔、用于其他、能量回收和填埋六种途径,80%以上涉及材料回收利用^[57-58],因此本文对车辆铸铁、长钢、扁碳、钢、轧铝、挤压、铝铸和铝^[28,47]六种主要回收材料进行核算。柴油和纯电动公交车车辆材料^[28,16]和电池材料^[28]的质量分布、制造产率 Y 和材料碳排放系数如表 2 和表 3 所示,回收材料^[47]的质量分布、汽车报废回收比、回收相关碳排放系数 β (当 β 大于 0 则表示材料在车辆周期外的初级生产即可抵消车辆在生产制造和使用阶段的碳排放)和材料碳排放系数(其中 I_p 和 I_s 分别代表车辆材料生产过程中和报废后回收的单位碳排放量)如表 4 所示。

表 2 柴油公交车和纯电动公交车材料重量分布、制造产率和材料碳排放系数

Table 2 Weight distribution, manufacturing yields, and carbon dioxide emission coefficients for material production for diesel bus and pure electric bus

材料 Material	柴油公交车 Diesel bus/kg	纯电动公交车 Pure electric bus /kg	制造产率 Y Manufacturing yield	CO ₂ 排放系数 CO ₂ emission factor /(g/kg)
钢 Steel	7476	8831	0.7	6821
铸铁 Cast iron	1308	266	0.8	1209
锻铝 Wrought aluminum	264	133	0.6	19436
铸铝 Cast aluminum	552	732	0.8	20588
铜 Copper	228	625	0.5	3670
玻璃 Glass	348	465	0.5	1954
塑料 Plastic	1332	1609	0.5	6478
橡胶 Rubber	276	239	0.5	3951

1.1.3 碳排放情景模拟

基于未来我国能源结构优化^[43-45,59-60]和煤电技术发展^[46-47,60-64],在 2020、2035 和 2050 年的基准、低碳、强

化低碳情景下,对杭州市公交车油改电项目进行碳减排模拟。基准、低碳、强化低碳情景设定基于我国超高压机组(UU)和亚临界机组(SU)和国际先进的超临界机组(SC)、超超临界机组(USC)和煤气化联合循环的煤电技术组合(IGCC),IGCC 电站可通过在煤炭燃烧前分离和捕集 CO₂显著减少单位电力生产的碳排放量。此外当前碳捕集和封存技术(Carbon Capture and Storage, CCS)发展迅速,该技术可将捕集的 CO₂长期封存在地下,碳减排率可达 90%^[46],具体如表 5 所示。

表 3 纯电动公交车电池材料重量分布、制造产率和材料生产碳排放系数

Table 3 Weight distribution, manufacturing yields, and carbon dioxide emission coefficients for battery material production for pure electric bus

电池材料 Battery material	质量 Weight/kg	制造产率 Y Manufacturing yield	CO ₂ 排放系数 CO ₂ emission factor/(g/kg)
磷酸铁锂 Lithium iron phosphate	786	1	2843
石墨 Graphite	343	1	1117
粘合剂 Adhesives	59	1	3339
铜 Copper	256	0.5	3065
锻铝 Wrought aluminum	449	0.6	11200
钢 Steel	33	0.7	2279
电子元件 Electronic component	28	1	40472
六氟磷酸锂 LiPF ₆	42	1	20616
碳酸乙烯酯 Ethylene carbonate	125	1	2019
碳酸二甲酯 Dimethyl carbonate	125	1	2019
塑料:聚丙烯 Plastic: Polypropylene	40	0.5	4887
塑料;PE Plastic;PE	28	0.5	5411
冷却液;乙二醇 Coolant: Ethylene glycol	24	1	1775

表 4 柴油公交车和纯电动公交车回收材料质量分布、汽车报废回收比、回收相关碳排系数和材料碳排系数

Table 4 Mass distribution, car scrap recovery ratio, carbon recovery ratio, and material carbon emission coefficient of recycled materials for diesel bus and pure electric bus

材料 Materials	柴油公交车 Diesel bus/ kg	纯电动 公交车 Pure electric bus /kg	汽车报废 回收比 Vehicle scrap and recycling ratio/%	回收相 关系数 β Relevant recycling factor /%	生产过程回 收碳排放 L _p Carbon emissions of recycling during production/(g CO ₂ /kg)	报废过程回 收碳排放 L _s Carbon emissions of recycling during Scrap/(g CO ₂ /kg)
铸铁 Cast iron	5320	4800	91.60	-8.50	1.87	0.399
长钢 Long steel	1995	1800	92.00	5.40	1.87	0.399
扁碳钢 Flat carbon steel	5719	5160	93.30	78.30	1.87	0.399
轧铝 Rolled aluminum	133	120	85.10	76.50	10.51	0.69
挤压铝 Extruded aluminum	133	120	81.30	73.10	10.51	0.69
铸铝 Cast aluminum	665	600	81.30	-3.40	10.51	0.69

表 5 2020、2035 和 2050 年煤电技术情景设定

Table 5 2020, 2035, 2050 coal and electricity technology scenario settings

年份 Year	基准背景 Benchmark scenario	低碳背景 Low-carbon scenarios	强化低碳背景 Strengthen low-carbon scenarios
2020	SU 为主	SC, USC 为主 IGCC 为辅	IGCC 为主,新建 IGCC 电站全部使用 CCS
2035	SC 为主, USC 为辅	IGCC 为主, IGCC 电站全部采用 CCS	IGCC 为主, IGCC 电站全部采用 CCS
2050	USC 为主, SC 为辅	IGCC 为主, IGCC 电站全部采用 CCS	IGCC 为主, IGCC 电站全部采用 CCS

当前杭州市有 2312 辆纯电动公交车,混合电动公交车折合 1/2 纯电动公交车核算。我们假设杭州市公

公交车总量恒定在 5000 辆,且到 2050 年全城均为纯电动公交车,则 2020 年车辆数约 3000 辆,2035 年约 4000 辆。

1.2 数据来源

本研究涉及的数据包括燃料周期的燃料上游、燃料下游和车辆生命周期包括原料生产与加工、装配与制造、车辆运行、设施运营与维护、报废与回收各阶段的物质和活动等碳排系数及消耗量。相关数据来源主要是文献、比亚迪官网、杭州公交车集团、杭州市能源发展“十三五”规划、国家技术监督局、国家统计局、国家能源局、国家发改委能源研究所、全国电力工业统计快报(2016)、中国能源统计年鉴(2015)、美国阿贡国家实验室 GREET 模型等。公交车全生命期排放的 CO_2 占温室气体排放量的 99.8%,且鉴于本文研究尺度,只计算生命周期 CO_2 排放量,不包括其他温室气体。

1.3 计算模型

本文基于生命周期框架,采用排放系数法计算碳排量,单位为克二氧化碳当量每千克物质($\text{CO}_2\text{eq/kg}$)。公交车生命周期各阶段计算公式如下所示:

(1) 燃料生产运输生命周期碳排放计算公式^[28]为:

$$I_f = C_e \times E \times S \quad (1)$$

式中, I_f 表示燃料生产运输过程中碳排放量; C_e 表示燃料当量排碳系数; E 表示能源利用效率; S 表示能源消费结构比例。

(2) 公交车原料生产与加工碳排放计算公式^[28,47]为:

$$I_p = \sum_{i=1}^n \frac{M_i \times C_i}{Y} \quad (2)$$

式中, I_p 表示公交车原料生产与加工碳排放量; M_i 表示材料生产质量; C_i 表示材料碳排系数; Y_i 表示材料生产率。

(3) 公交车运行阶段碳排放计算公式^[67]为:

$$I_u = \frac{FE \times EF \times U}{TE} \quad (3)$$

式中, I_u 表示公交车运行阶段碳排放量; FE 表示公交车百公里耗油/电量; EF 表示单位电力或柴油碳排量; U 为公交车行驶里程; TE 表示充电效率/输油效率。

(4) 公交车运营设施建设和维护阶段碳排放计算公式为:

$$I_{c\&m} = (I_c + I_m) \times U \quad (4)$$

式中, $I_{c\&m}$ 表示公交车运营设施建设和维护阶段碳排放量; I_c 表示公交车运营设施建设阶段碳排系数; I_m 表示公交车运营设施维护阶段碳排系数; U 为公交车行驶里程。

(5) 公交车回收过程中碳排放计算公式^[47]为:

$$I_{re} = \sum_{i=1}^n (-M_i \times \beta \times (I_{pi} - I_{si})) \quad (5)$$

式中, I_{re} 表示公交车回收过程中碳排放量; I_{pi} 代表车辆材料生产过程中回收的单位碳排量; I_{si} 代表车辆材料报废后的回收单位碳排量; M_i 代表不同材料质量; β 表示回收相关碳排系数,当 β 大于 0 则表示材料在车辆周期外的初级生产即可抵消车辆在生产制造和使用阶段的碳排放。

1.4 不确定性分析

由于部分数据缺乏和涉及核算条目繁琐等原因,生命周期评估中部分非核心过程如车辆运输和车辆运营维护中除电池和轮胎外等阶段碳排放量核算暂时忽略,部分过程如柴油生产、车辆原料生产、动力电池生产和报废车辆材料回收等只核算重点原料和零部件。部分参数缺乏时采用其他相关参数替代或设定一定假设前提如因柴油加工过程数据缺乏而使用石油制品加工业平均水平数据来替代和用全国电力输送平均损耗率替代杭州市电力输送损耗率等,此外如柴油输送过程中的漏油和车辆加油过程中的挥发等损耗量等也暂时被忽

略。因此本文生命周期碳排放核算结果存在不确定性,但这些不确定过程产生的碳排放量相比生命周期内其他排放量占比非常小,因此这种不确定性不足以影响研究的结论。

2 核算结果与讨论

2.1 单辆公交车碳排放核算结果与讨论

本文根据已有数据,对杭州市柴油公交车和纯电动公交车全生命周期碳排放量进行了评估,具体评估结果如下。

2.1.1 燃料周期碳排放情况

原油开采和运输过程中 CO₂排放量分别为 89.179 t 和 25.252t。柴油加工过程 CO₂排放量为 86.380t。柴油运输阶段 CO₂排放量为 12.066t。因此,柴油的燃料生命周期 CO₂排放总量为 212.877t(表 6)。

电力生产中原煤生产和电煤运输阶段 CO₂排放量分别为 39.429t 和 5.299t,其他原料生产和运输阶段 CO₂排放量为 18.648t。2016 年电厂煤电和水电碳排系数分别为 769.704g CO₂ · kWh⁻¹和 173.3g CO₂ · kWh⁻¹,天然气碳排比煤炭低 43%^[51],天然气电碳排系数为 438.731g CO₂ · kWh⁻¹。电力生产过程 CO₂排放量为 704.442t,电力运输过程 CO₂排放量为 49.678t。因此,电力生命周期 CO₂排放总量为 817.497t(表 6)。

2.1.2 车辆周期碳排放情况

柴油公交车和纯电动公交车车辆原料生产和加工阶段 CO₂排放量为 120.054t 和 213.457t,其中纯电动公交车每组电池生产需产生 CO₂排放量 14.713t,生命周期内产生 CO₂排放总量为 88.280t。两种公交车装配和制造阶段工艺一致,其 CO₂排放量均为 1.580t。柴油公交车和纯电动公交车运行过程 CO₂排放量分别为 1005.670t 和 0t。柴油公交车基础设施建设和运营 CO₂排放量分别为 0.532t 和 0.912t,运营 CO₂总排放量为 1.444t。纯电动公交车需新建充电桩和换电站等设施,其充电桩建设和运营阶段 CO₂排放量分别为 1.702t 和 2.917t,换电站建设 CO₂排放量为 7.800t,运营 CO₂排放总量为 12.618t。柴油公交车和纯电动公交车维护过程中轮胎生命周期 CO₂排放量分别为 69.160t 和 51.870t。柴油公交车和纯电动公交车报废与回收阶段 CO₂排放量分别为 -8.311t 和 -10.876t。

2.1.3 生命周期碳排放情况汇总

杭州市纯电动和柴油公交车生命周期 CO₂排放量分别为 1103.237t 和 1401.319t,燃料生命周期和车辆生命周期碳排放核算结果汇总如表 6 所示,各阶段占比如图 3 所示。

表 6 两种公交车生命周期各阶段碳排放量
Table 6 The carbon emission of the two types of buses at all life cycle stages

生命周期阶段 Life cycle phase	原料生产加工 Material production and process/t		装配制造 Assembly and manufacture/ t		公交车运行 Operation/t		设施运营维护 Facility operation and maintenance/t		报废回收 Scrap and recycling/t	总和 Sum/(t)
	车辆	电池	装配与制造	燃料上游	燃料下游	运营	维护	回收	-	
	柴油公交车 Diesel bus	120.054	0	1.580	212.877	1005.670	1.444	51.870	-8.311	1401.319
电动公交车 Pure electric bus	125.178	88.280	1.580	817.497	0	4.618	69.160	-10.876	1103.237	

根据上文核算结果我们发现杭州市纯电动公交车相比柴油公交车 LCA 碳减排率达 21.27%,其产生的巨大碳排差距主要来自燃料周期,该阶段碳减排率高达 32.91%。Hawkins 等^[66]在欧洲电力背景下对 20 万里程的纯电动汽车与柴油车碳排放进行 LCA 碳排放比较后得出车辆碳减排比例在 17%—20%之间,并根据不同里程设定而略微浮动。黎土煜^[13]、王宁^[19]和宋凌璐^[18]利用 GREET 模型分析后得到纯电动汽车比柴油汽车的 CO₂排放量分别减少了 19.7%(约 160 吨)、20.2%和 5.3%,本文核算结果与前两者碳减排比例基本一致,但与最后一个结果有明显差异,这主要是由于宋凌璐研究的车型是卡车,巨大的载重量造成的油改电碳排放效

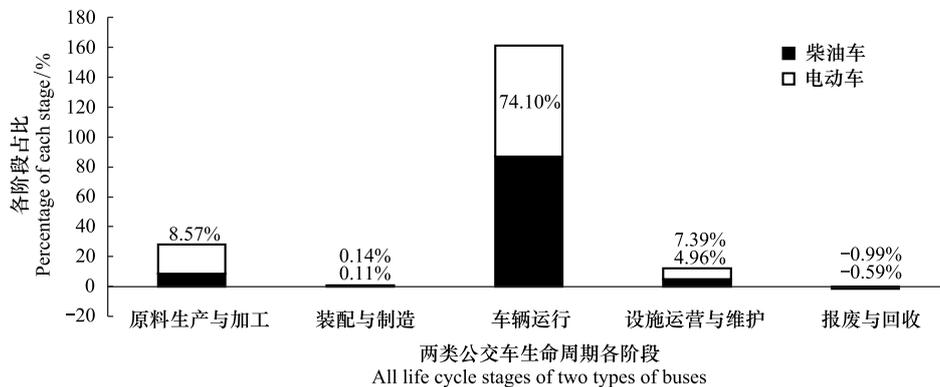


图3 杭州市柴油公交车和纯电动公交车生命周期各阶段碳排放量比例

Fig.3 Carbon emission of the diesel bus and pure electric bus at all life cycle stages at Hangzhou City

益明显降低,因此总体来说本文的研究结果准确可靠。

纯电动公交车原料生产和加工阶段碳排放量明显高出柴油公交车,单辆车碳排放超额比例为 77.80%,巨大碳排放差距的来源除了两类车材料质量分布差异外主要来自纯电动公交车动力电池生产与制造,超额比例为 73.53%。这是因为电池制造涉及材料众多,组装工艺复杂,动力电池原料生产和制造组装过程中产生碳排放同样较高,且考虑当前动力电池效能技术限制,车辆生命周期内需更换一次动力电池。资源回收再制造相当于在有效减少下一辆公交车部分原料生产的碳排放,因此两类公交车报废与回收阶段碳排放均为负值,纯电动公交车由于动力电池使用材料种类较多、质量较大且资源回收率高,因此报废与回收阶段碳排放略低于柴油公交车,但当前动力电池精细回收再利用依然有不少技术瓶颈,该部分是增加纯电动公交车碳减排效益的重要过程,因此未来纯电动公交车动力电池生产和回收技术的发展将会极大提升碳减排效益。由于纯电动公交车需新建充电桩和换电站等设施,因此纯电动公交车充电桩建设和运营碳排放要比柴油公交车基础设施建设和运营阶段碳排放高 38.38%。需要指出的是换电站建设虽然会产生巨大碳排放,但车均碳排放并不大。因此杭州市公交车油改电过程中新建充电站和换电站额外增加的碳排放相对有限,加快充电桩等配套设施建设有助于尽快实现碳减排。

2.2 杭州市纯电动公交车碳减排核算结果与讨论

目前杭州市在营电动公交车生命周期内碳减排量达到 68.917 万 t,公交车油改电进行约 3.5 年后才能真正实现相对碳减排,如图 4 所示。

由上述核算结果可知当前杭州全城纯电动公交车年均减排 5.301 万 t,相当于每年植树近 50 万棵或者停开近 4 万辆经济型轿车,产生的碳减排效益巨大。部分城市如南京市也对电动车替换燃油车碳减排量进行了评估,结果显示南京市在 2014—2015 年共增设 4300 辆电动车,在一年内碳减排量达到 24.6 万 t^[67]。此外有部分采访指出杭州市年均减少燃油消耗 4144.66 万升以上,年均减少碳排放 10.9 万 t 以上^[68]。以上城市层面碳减排结果和本文有较大差异,这些差异的产生原因各不相同。本文碳减排结果明显少于南京市,这主要是

不同城市之间由于电动车辆类型(电动公交车和电动汽车)、数量(3000 辆与 4300 辆)和城市之间的车辆配套设施的配备情况(充电桩数量和位置设置)等产生的综合结果。采访中的杭州公交车碳减排量大于本文研究结果主要是该采访人并未用 LCA 方法全面分析,只核算了燃料替代产生的碳减排量,而忽略了车辆制造及电

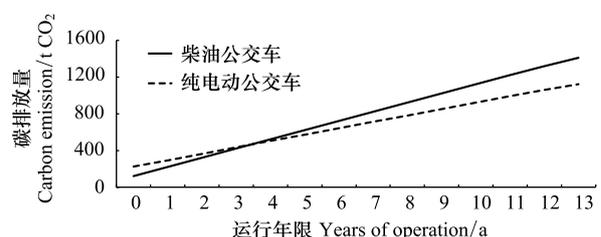


图4 不同运营年限下的两类公交车碳排放对比

Fig.4 Comparison of carbon emission between diesel bus and pure electric bus under different operating years

力生产等过程中的碳排放量,导致结果偏大。其次在杭州市公交车油改电进程中,碳减排效益在车辆生命周期的中前期便可达到目的,碳排放潜力客观。此外杭州市全城纯电动公交车还涉及到充电行驶最短总路程的最优解问题,充电桩的高效科学配置有助于减少消耗,增加碳减排效益。复杂城市工况下的纯电动公交车运行会消耗更多电力,产生更多碳排放,城市交通环境的优化将使纯电动车辆电力额外消耗和车辆磨损等减少,有助于加强纯电动公交车碳减排效益。

2.3 杭州市碳排放情景模拟结果与讨论

基于未来我国能源结构优化和煤电技术发展预测结果,2020、2035 和 2050 年我国单位发电碳排放量在基准情景下分别是 601.191、537.066g/kWh 和 474.163g/kWh;在低碳情景下分别是 414.351、273.606g/kWh 和 212.548g/kWh;在强化低碳情景下分别是 302.435、208.660g/kWh 和 182.558 g/kWh,如图 5 所示。

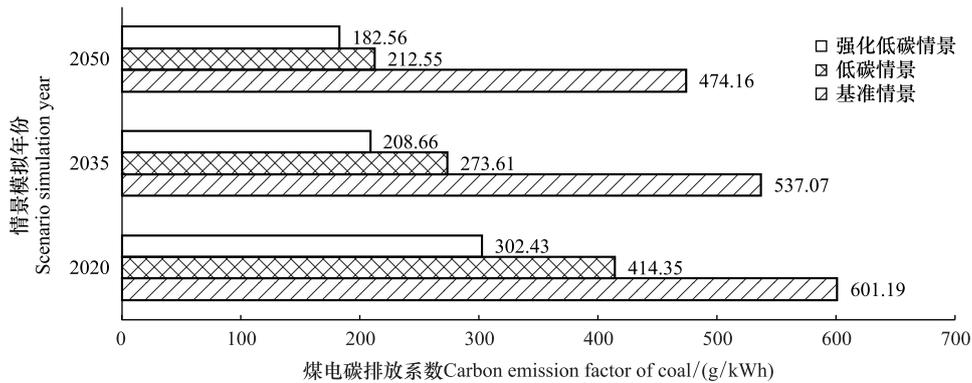


图 5 2020、2035 和 2050 年不同情景下煤电碳排放系数

Fig.5 Coal and electricity technology scenario settings in 2020, 2035 and 2050

基于不同煤电技术发展及发电能源结构优化,三种情景下纯电动公交车在 2020、2035 和 2050 年的生命周期 CO₂排放量结果如图 6 所示。在基准情景下,CO₂排放量分别是 1047.248t、966.024t 和 886.346 t,碳减排率分别为 25.27%、31.06%和 36.75%;在低碳情景下,CO₂排放量分别是 810.585t、632.308t 和 554.967t,碳减排率分别为 42.16%、54.88%和 60.40%;在强化低碳情景下,CO₂排放量分别是 668.824t、550.043t 和 517.980 t,碳减排率分别为 52.27%、60.75%和 63.11%。2050 年强化低碳情景下,每辆纯电动公交车生命周期 CO₂排放量约为当前纯电动和柴油公交车生命周期 CO₂排放量的 46.86%和 36.89%。

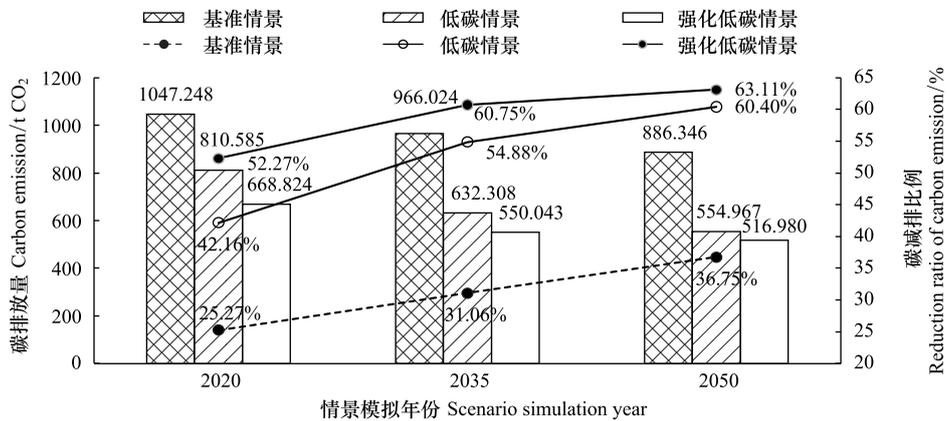


图 6 2020、2035 和 2050 年三种情景下每辆纯电动公交车生命周期碳排放量及相对柴油公交车减排比例

Fig.6 Life cycle carbon emission amounts of each pure electric bus and emission reduction ratio relative to diesel bus under different scenarios in 2020, 2035 and 2050

3 种情景下,纯电动公交车在 2020、2035 和 2050 年的 LCA 碳减排总量如图 7 所示。在基准情景下,杭州

市在 2020、2035 和 2050 年全城纯电动公交车碳减排总量分别为 106.191、174.078 和 257.436 万 t;在低碳情景下分别为 177.190、307.564 和 423.126 万 t;在强化低碳情景下分别为 219.719、340.470 和 442.119 万 t。2020、2035 和 2050 年杭州市公交车油改电年均碳减排量在基准情景下分别为 8.169、13.630 和 16.901 万 t;在低碳情景下分别为 13.391、23.659 和 26.190 万 t;在强化低碳情景下分别为 19.803、32.548 和 34.009 万 t。

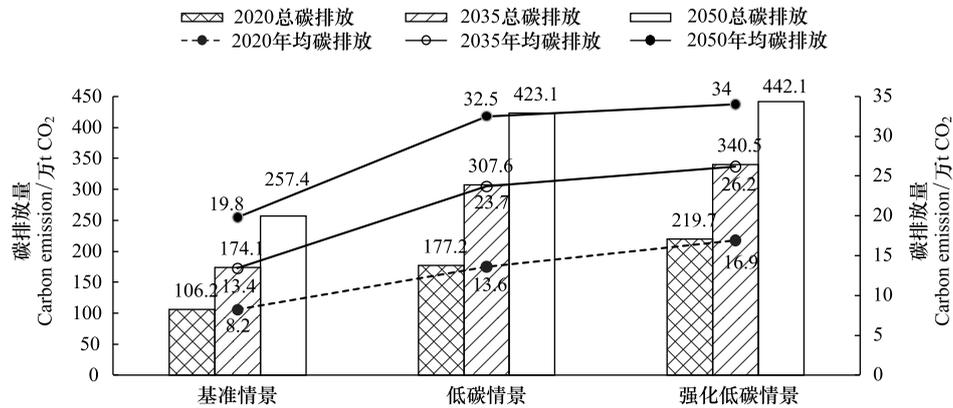


图 7 2020、2035 和 2050 年 3 种情景下杭州市所有纯电动公交车生命周期内碳减排量和年均碳减排量

Fig.7 Total carbon reduction amount and per year reduction amount within the entire life cycle of the pure electric bus relative to diesel bus under different scenarios in 2020, 2035 and 2050

根据以上碳排放模拟结果,研究发现纯电动公交车生命周期碳减排效益与新煤电技术的运用和杭州市电力能源结构紧密相关,清洁煤电和良好电力能源结构将使 2020、2035 和 2050 年车辆碳排放量减少 25.27%—63.11%,不同的电源情景碳减排模拟结果相比施晓清等^[67]认为的 57%—81.2%略低,两者的差异主要由研究的车型不同(公交车和出租车)和电力结构(杭州市和北京市)造成的,质量相对较轻的出租车油改电碳减排效益更显著,不同城市的电力结构也会对碳减排效益产生影响。Arar^[14]和欧训民^[33]模拟的 2020 年碳减排率分别为 36%和 40.83%,均在本文 2020 年 3 种模拟情景下的碳减排率 25.27%—52.27%之间,这表明本文模拟结果具有较强可信度。至于模拟结果差异,前者主要是中美两国在电力能源结构和清洁能源政策等上的差异,而后者主要是采取的模型和数据更新等导致的差异。2017 年末,杭州市电力本地生产约占 20%(其中煤电、天然气电、核电和其他能源分别占比 21%、53%、22%和 4%)^[44],外地调入约占 80%(其中煤电、水电、核电和其他能源分别占比 71.60%、19.71%、3.56%和 5.13%)^[45]。虽然发电能源结构中煤电占比较低,产生碳排放量有限,但调入电力的能源结构由调出地电力能源结构决定,一般调出地为经济欠发达地区,发电能源结构中煤电占比较高且煤电技术落后,优化以煤电为主的电力结构和采用 IGCC 等新煤电技术将对杭州市公交车油改电产生显著碳减排效益。最后,当前关于电动公交车的节能减排研究仍存在一定的不足,其环境效益研究尚不够系统化,定量的研究较少,尤其是节能减排政策对电动公交车推广的环境效应的定量研究比较缺乏,对其背后的社会、经济和环境驱动因素和驱动机理认识更是知之甚少。因此未来此方面研究应着重于:(1)开展基于中国国情的电动公交车生命周期社会经济反馈研究。城市公交车油改电进程不仅仅只是科学层面的问题,还涉及到社会反响、多元化融资渠道等方面;(2)从系统化的角度、综合交叉学科的方法、选取量化指标着重分析节能减排政策的作用效应和机理,以便为节能减排政策的顶层设计、实施方案、效果评估以及政策修订和出台新政策提供科学依据。

3 结论

(1)杭州市单辆纯电动公交车相比柴油公交车在全生命周期尺度碳减排有明显优势,其产生的巨大碳减排差距主要来自燃料周期(电力与柴油生产到消耗过程差异),而动力电池生产技术和精细回收再利用能力的提升也将是增加未来纯电动公交车碳减排效益的关键之一。此外新建充电站和换电站额外增加的碳排放量相

对有限,加快杭州市充电桩等配套设施建设有助于尽快实现碳减排。

(2)在杭州市油改电进程中,碳减排效益需在纯电动公交车运行一定年限后才能显现,但基本在车辆生命周期的中前期便可达到目的,结合当前杭州市在营运的纯电动公交车生命周期内碳减排总量及年均碳减排量,碳减排潜力较为可观。充电桩的高效空间配置和城市交通环境的优化有助于减少消耗,增加碳减排效益。

(3)纯电动公交车生命周期碳减排效益与新煤电技术运用和城市电力能源结构紧密相关,清洁煤电和良好电力能源结构将使2020—2050年车辆碳排放量显著减少,优化以煤电为主的电力结构和采用IGCC等新煤电技术将对杭州市公交车油改电产生显著碳减排效益。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Stockholm: IPCC, 2013.
- [2] 屈超, 陈甜. 中国2030年碳排放强度减排潜力测算. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7): 62-69.
- [3] 龙少波. 贸易自由化对中国碳排放影响的研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2012.
- [4] 刘睿, 翟相彬. 中国燃煤电厂碳排放量计算及分析. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1164-1169.
- [5] 关海波, 金良. 中国交通运输碳排放测度及未来减排情景模拟. 未来与发展, 2012, 35(7): 55-59.
- [6] 赵风华. 张来斌委员: 我国应加快推广二氧化碳封存技术. 科技日报, (2010-03-16) [2017-06-30]. http://www.cas.cn/xw/zjzd/201003/120100316_2798088.shtml.
- [7] Gielen D, Chen C H. The CO₂ emission reduction benefits of Chinese energy policies and environmental policies: a case study for Shanghai, period 1995-2020. *Ecological Economics*, 2001, 39(2): 257-270.
- [8] 李海鹰. 浅谈巴黎气候大会后中国碳减排问题. 现代商业, 2017(11): 163-164.
- [9] 中华人民共和国科技部、财政部、发改委、工业和信息化部. 关于开展节能与新能源汽车示范推广试点工作的通知. 北京: 中华人民共和国科技部、财政部、发改委、工业和信息化部, 2009.
- [10] 中华人民共和国国务院. 节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020). 北京: 中华人民共和国国务院, 2012.
- [11] 浙江省人民政府. 浙江省人民政府办公厅关于印发浙江省加快推进绿色交通发展指导意见的通知. 杭州: 浙江省人民政府, 2015.
- [12] 浙江省人民政府. 关于印发浙江省创建国家清洁能源示范省行动计划(2016—2017年)的通知. 杭州: 浙江省人民政府, 2015.
- [13] 黎土煜, 余大立, 张洪申. 基于GREET的纯电动公交车与传统公交车全生命周期评估. 环境科学研究, 2017, 30(10): 1653-1660.
- [14] Arar J I. New Directions: the electric car and carbon emissions in the US. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(5): 733-734.
- [15] 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. *Energy Policy*, 2012, 48: 537-550.
- [16] Li S H, Li N N, Li J, Gao Y. Vehicle cycle energy and carbon dioxide analysis of passenger car in China. *AASRI Procedia*, 2012, 2: 25-30.
- [17] 高玉冰, 毛显强, 杨舒茜, 吴烈, 董刚. 基于LCA的新能源轿车节能减排效果分析与评价. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1504-1512.
- [18] 宋凌璐, 葛帅, 冯莉原. 电动卡车与燃油卡车全生命周期能耗与排放对比研究. 环境工程, 2017, 35(增刊2): 409-413, 460-460.
- [19] 王宁, 龚在研, 马钧. 基于经济与排放效益的混合动力和纯电动公交车发展前景分析. 中国软科学, 2011, (12): 57-65.
- [20] Kambly K R, Bradley T H. Estimating the HVAC energy consumption of plug-in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2014, 259: 117-124.
- [21] Zhang L, Huang Z. Life cycle study of coal-based dimethyl ether as vehicle fuel for urban bus in China. *Energy*, 2007, 32(10): 1896-1904.
- [22] Ou X M, Zhang X L, Chang S Y. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 406-418.
- [23] Arteconi A, Brandoni C, Evangelista D, et al. Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe. *Applied Energy*, 2010, 87(6): 2005-2013.
- [24] 杨烜. 基于GREET的汽车代用燃料生命周期评价[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [25] 李飞龙, 郭孔辉, 杨沿平, 等. 基于GREET模型的汽车材料轻量化能耗评价研究. 中国机械工程, 2013, 24(5): 681-685.
- [26] Mayyas A, Omar M, Hayajneh M, et al. Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 687-701.
- [27] Holmberg K, Andersson P, Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*, 2012, 47: 221-234.
- [28] 李书华. 电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [29] Lajunen A. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 38: 1-15.
- [30] Weiller C, Sioshansi R. The role of plug-in electric vehicles with renewable resources in electricity systems. *Revue d'Économie Industrielle*, 2014, 148: 291-316.
- [31] Ou X M, Yan X Y, Zhang X L, et al. Life-cycle analysis on energy consumption and GHG emission intensities of alternative vehicle fuels in China. *Applied Energy*, 2012, 90(1): 218-224.

- [32] 康利平, Earley R. 电动汽车真的节能减排吗? 能源评论, 2011, (11): 87-89.
- [33] 宋永华, 李保卫, 胡泽春. 我国电动汽车碳排放区域特征分析. 中国能源, 2013, 35(5): 12-16.
- [34] 王国梁. 生命周期方法在环境影响评价中的应用. 中国科技投资, 2014 (A03): 471-471.
- [35] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24040-2008 环境管理 生命周期评价 原则与框架[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [36] 武民军. 燃煤发电的生命周期评价[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [37] 陈长勇. 基于城市循环工况的天然气城市客车动力传动系统优化匹配研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [38] 代幼文. 纯电动公交客车的能量快速补充及相关分析——以恒通 CKZ6127HBEV 快速充电式电动客车为例. 城市公共交通, 2011 (11): 50-52, 56-56.
- [39] 刘勇. 比亚迪 CK6120LGEV 纯电动城市客车跟踪报道(一). 驾驶园, 2012 (8): 8-9.
- [40] Contestabile M, Offer G, North R. Electric Vehicles: A Synthesis of the Current Literature with a Focus on Economic and Environmental Viability. London: LCA Works, 2012.
- [41] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2015. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [42] 谢鸿宇, 王习祥, 杨木壮, 李澄, 钟世锦, 汪武. 机动车燃料碳排放分析. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2011, 35(5): 1040-1043, 1048-1048.
- [43] 杭州市人民政府. 杭州市人民政府办公厅关于印发杭州市能源发展“十三五”规划的通知. 杭州: 杭州市人民政府, 2016.
- [44] 杭州市人民政府. 杭州市人民政府办公厅关于印发杭州市 2017 年大气污染防治实施计划的通知. 杭州: 杭州市人民政府, 2016.
- [45] 中国电力企业联合会. 全国电力工业统计快报(2016 年). 北京: 中国电力企业联合会规划发展部, 2016.
- [46] 夏德建. 基于情景分析的发电侧碳排放生命周期计量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [47] 潘湘源. 基于生命周期理论的纯电动汽车碳排放研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- [48] 蔡淳. 电动汽车电能需求引致的电力产业链碳排放计量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [49] 艾江鸿, 李海峰, 林鉴军. 电动汽车的全寿命周期环境影响分析. 技术经济, 2010, 29(3): 35-39.
- [50] 张秀媛, 杨新苗, 闫琰. 城市交通能耗和碳排放统计测算方法研究. 中国软科学, 2014 (6): 142-150.
- [51] 冯超, 王科, 徐志强, 公丕芹. 基于混合生命周期方法的私人电动汽车温室气体排放研究. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(10): 178-187.
- [52] 熊宝玉. 住宅建筑全生命周期碳排放量测算研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [53] 杨蕾. 轮胎生命周期的经济、能量和碳排放分析[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [54] 沈万霞, 张博, 丁宁, 王薛超, 卢强, 王成. 轻型纯电动汽车生产和运行能耗及温室气体排放研究. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4409-4417.
- [55] Argonne National Laboratory. GREET © 2016 model. (2013-10-25) [2017-09-10]. <http://greet.es.anl.gov/>.
- [56] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2003. 北京: 中国统计出版社, 2003.
- [57] 肖军. 汽车报废回收及循环利用. 交通与运输, 2013, 29(6): 28-29.
- [58] 方海峰, 黄永和. 汽车回收利用是节能减排的重要途径. 汽车工业研究, 2008 (11): 38-40.
- [59] 郭连兴. 超临界大型机组是我国煤电发展的主要方向. 天津电力技术, 2006 (2): 19-19.
- [60] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 刘强. 中国 2050 年低碳情景和低碳发展之路. 中外能源, 2009, 14(6): 1-7.
- [61] 张少华, 王东波. 洁净煤电发电技术探讨分析. 能源与节能, 2012 (3): 13-16.
- [62] 郭士伊, 常华. 全球碳捕集与封存(CCS)进展分析及建议. 节能与环保, 2011 (10): 56-59.
- [63] 顾[摘]. CCS+IGCC: 未来燃煤发电的完美组合. 低温与特气, 2007 (4): 33-33.
- [64] Lujs, Abadje, Jose, Chamorro M. 煤的气化——清洁选择: 煤合成气——天然气的竞争者, 清洁、廉价的电厂燃料. 经济导报: 电力能源, 2007 (1): 19-20, 22-25, 27-27.
- [65] 施晓清, 李笑诺, 杨建新. 低碳交通电动汽车碳减排潜力及其影响因素分析. 环境科学, 2013, 34(1): 385-394.
- [66] Hawkins T R, Singh B, Majeau-Bettez G, Strömman A H. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17(1): 53-64.
- [67] United Nations Environment Programme. The Emissions Gap Report 2017: A UN Environment Synthesis Report. Nairobi: UNEP, 2017.
- [68] 婷婷汽车. 2312 辆! 杭州纯电动公交车 8 成是比亚迪! 为何不是宇通客车. (2017-04-26) [2017-09-30] <http://baijiahao.baidu.com/s?id=1565747831205890&wfr=spider&for=pc>.