

匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期节能减碳评价研究

陈轶嵩, 郝卓, 兰利波, 付佩, 陈昊

(长安大学, 西安 710064)

摘要: 为评估匹配不同动力电池的纯电动汽车 (Battery Electric Vehicle, BEV) 全生命周期环境影响, 以某款已上市纯电动汽车为研究对象, 分别匹配4款常用动力电池, 基于GaBi软件搭建生命周期评价模型, 对其进行2021年与2030年全生命周期能源消耗与环境排放研究, 并选取关键参数因子进行敏感性分析。研究表明, 匹配钛酸锂电池的纯电动汽车化石能源消耗(ADP(f))与全球变暖潜值(Global Warming Potential, GWP)均为最高; 纯电动汽车在运行使用阶段与生产制造阶段具有较高的能耗与排放; 到2030年, 纯电动汽车全生命周期ADP(f)与GWP将显著降低, 同时随着电力结构的优化与动力电池充电效率的提升, 匹配不同动力电池的整车ADP(f)与GWP也将随之降低。

关键词: 动力电池; 纯电动汽车; 全生命周期评价; 节能减碳; 预测分析

中图分类号: U469.72 DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.04.15

Research on Energy Saving and Carbon Reduction over the Life Cycle of Battery Electric Vehicles with Different Power Batteries

CHEN Yishong, HAO Zhuo, LAN Libo, FU Pei, CHEN Hao

(Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to evaluate the life cycle environmental impacts of battery electric vehicles (BEV) with different power batteries, four commonly used power batteries were studied. A life cycle assessment model was built based on Gabi software to predict the vehicle energy consumption and environmental emissions by 2030, and then the key parameter factors for sensitivity analysis were selected. The results show that the abiotic depletion potential (fossil)(ADP_f) and the global warming potential(GWP) of the battery electric vehicles with LTO batteries were highest. Higher energy consumption and greater emissions were found during the operation mode and in the production and manufacturing stages. By 2030 the life-cycle ADP_f and GWP values of BEV will be significantly reduced, and with the optimization of power structure and the improvement of charging efficiency of power batteries, the vehicle ADP_f consumption and GWP emissions when matching with different power batteries will be reduced as well. The paper provides an answer to the question of whether battery electric vehicles meet the requirements of cleaner production over the life cycle.

Keywords: power battery; battery electric vehicle; life cycle assessment; energy saving and carbon reduction; forecasting and analysis

收稿日期:2022-05-10 改稿日期:2022-05-19

基金项目:国家重点研发计划项目(SQ2021YFE011519);陕西省重点产业创新链项目(2020ZDLGY16-08);陕西省青年科技新星项目(2021KJXX-15);陕西省交通运输厅科研项目(21-17R);中央高校基金(300102221106)

参考文献引用格式:

陈轶嵩, 郝卓, 兰利波, 等. 匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期节能减碳评价研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 517-527.

CHEN Yishong, HAO Zhuo, LAN Libo, et al. Research on Energy Saving and Carbon Reduction over the Life Cycle of Battery Electric Vehicles with Different Power Batteries[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(4): 517-527. (in Chinese)



在能源安全、环境保护与科技变革的推动下,中国纯电动汽车的技术与市场均取得了巨大的进展。同时,随着可持续发展战略的深化与“碳达峰、碳中和”目标地提出,对纯电动汽车全生命周期绿色可控与节能减碳重视程度更甚。作为纯电动汽车的唯一动力来源,动力电池未来必将持续生产、使用以及大量报废^[1],而动力电池在其全生命周期内具有大量能源输入与环境排放输出,对纯电动汽车的节能减碳成效影响巨大。

近年来,在纯电动汽车节能减排评价领域,国内外许多学者针对动力电池的能耗与环境影响评价等方面展开了系列研究。Ambrose等^[2]、ELLINGSEN等^[3]、DAI Qiang等^[4]、PETERSAC等^[5]借助全生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)模型对纯电动汽车车用锂离子电池(Lithium Ion Battery, LIB)进行资源消耗和环境影响分析;SUN Xin等^[6]、ACCARDO等^[7]基于中国本土锂电池供应商的数据清单,借助LCA方法评估并量化了镍钴锰三元锂离子电池(Nickel Cobalt Manganese, NCM)对纯电动乘用车和纯电动商用车生命周期环境影响;AHMADI等^[8]、CHEN Mengyuan等^[9]分析了磷酸铁锂电池(Lithium Iron Phosphate, LiFePO_4 , LFP)的制造、使用、回收及再利用等全生命周期各阶段的环境影响,其回收及再利用的清单数据为估测所得;针对LFP环境影响评价的研究,贾志杰等^[10]、LOAKIMIDIS等^[11]、ZHU Lingyun等^[12]、刘书如^[13]研究了废旧LFP电池的绿色回收技术、二次应用场景等,以最大限度降低废旧LFP电池对环境的潜在影响;RICHA等^[14]、李响等^[15]对纯电动汽车锰酸锂电池(Lithium Manganate, LiMn_2O_4 , LMO)的生产制造、运行使用以及报废回收3个阶段的环境影响进行评价与分析。殷仁述等^[16]对纯电动汽车车用钛酸锂电池(Lithium Titanate, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO)进行生命周期评价分析,得到LTO电池对资源、能源及环境的影响。针对纯电动汽车不同类型的动力电池的能耗与环境影响,部分学者也采用LCA方法对LIB和铅酸电池^[17]、LMO和LFP^[18-19]、LFP和NCM^[20]进行对比分析,以确定更加绿色环保的动力电池类型,但尚未深

入探讨4款动力电池对比情况及相关预测分析,且研究结果无法表征中国背景下匹配不同动力电池的纯电动汽车从摇篮到再生的全生命周期对资源、能源及环境的影响。

从国内外现有文献来看,目前关于纯电动汽车车用动力电池节能减排研究的评价对象多为单一类型的动力电池、两款传统电池对比分析、新型动力电池与传统电池对比分析以及电池装车对比分析,而针对市面上所常见的4款动力电池生命周期对比分析研究较少。因此,本文基于以往文献研究及其不足,从全生命周期角度对4款动力电池进行生命周期评价研究,并将4款动力电池作为变量匹配到同一款BEV中进行生命周期评价研究与敏感性分析。研究结果可为动力电池企业与整车企业生产制造及产品发展提供数据支撑,同时为汽车产业发展与技术进步提供参考依据。

1 评价方法

1.1 评价对象与数据来源

本文以当前市场中销量较高、技术相对成熟的比亚迪·秦系列纯电动汽车为研究对象,以该车相关参数为数据基础,分别搭载4款动力电池(LFP、NCM、LMO、LTO),并组件成为4款匹配不同动力电池的纯电动汽车,分别对4款BEV进行全生命周期ADF(f)和GWP定量评价计算,结合中国实景数据、技术路线、文献参考等因素对纯电动汽车2030年ADF(f)和GWP情况进行预测分析。4款动力电池与整车各阶段所需的实景数据主要来源于动力电池公司官网及国内外参考文献,上游背景数据主要来源于GaBi软件数据库。对于某些零部件的制造过程由于数据缺失进行相似处理,用相同类型的数据进行替代。

1.2 系统边界与功能单位

生命周期评价是指对一个产品的整个生命周期中所有输入、输出和潜在环境影响进行汇编和评价的过程。汽车LCA分析需要按照ISO14040进行^[21],首先需要明确研究目的、系统边界和功能

单位。本文旨在探索 2021 年及 2030 年我国动力电池及纯电动汽车生命周期内能源和环境排放的影响，因此将纯电动汽车全生命周期分为原材料获

取、制造装配、运行使用、报废回收 4 个阶段。动力电池及纯电动汽车的能源消耗与环境排放仅考虑 ADF (f) 与 GWP，系统边界如图 1 所示。

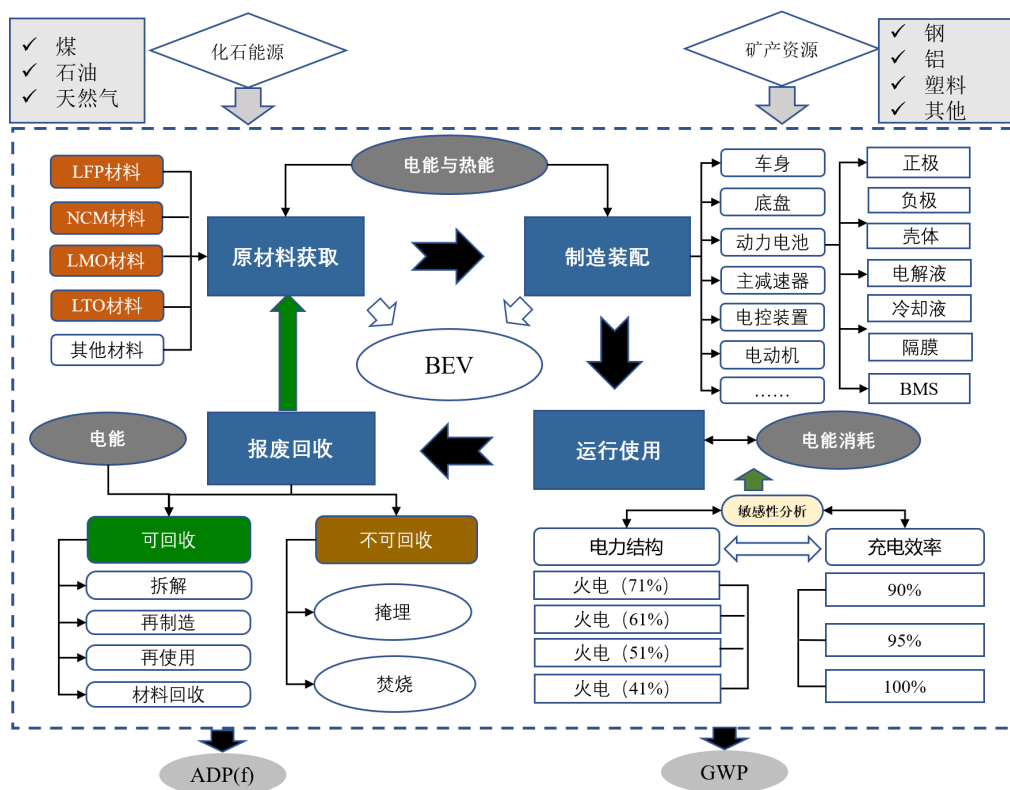


图 1 BEV 全生命周期评价系统边界

功能单位是指经过量化的产品功能或绩效特征，本文考虑车辆实际使用过程中的平均行驶里程数，选取该车型在中国道路上平均行驶里程 15 万 km^[22-23] 作为功能单位。

1.3 影响评价指标

影响评价是指在选定的影响指标和评价模型的基础上，将清单分析结果转化为潜在环境影响的过程^[24]。本文针对纯电动汽车及动力电池的相关特性，选取化石能源消耗量 ADF(f) 与 GWP(以 CO₂ eq 计)这两项指标用于衡量动力系统的化石能源消耗与温室气体环境排放影响，其单位分别为 MJ 与 kg。

2.1 原材料获取阶段

本文主要将纯电动汽车划分为车身、底盘、动力电池、电机、电控装置、流体几部分。将动力电池分为正极、负极、电解液、隔膜、壳体、冷却液、电池管理系统 (BMS) 等部分。动力电池各部

件上游原材料消耗数据见表 1，除动力电池的纯电动汽车各部件上游原材料的消耗数据见表 2。

2.2 制造装配阶段

车辆制造装配过程中主要产生部分电能与热能消耗，各部件与整车再制造装配阶段的电能与热能消耗见表 3~4。

2.3 运行使用阶段

纯电动汽车使用阶段的能源消耗与环境排放主要来源于电能的消耗，考虑比亚迪·秦 BEV 生命周期行驶里程为 150 000 km，基于百公里公称耗电 12.3 kWh/100 km 计算可知，整车运行使用阶段的电能消耗约为 69 916 MJ。

2.4 报废回收阶段

车辆报废回收阶段主要包括零部件再制造、再利用、材料回收、焚烧填埋等过程。

表1 4种不同动力电池的原材料消耗数据 单位: kg

部件	材料	LFP	NCM	LMO	LTO
正极	LFP ¹	82	-	-	-
	NCM ²	-	92	-	228
	LMO ³	-	-	144	-
	铝	68	64	79	112
	聚偏氟乙烯 PVDF ⁴	4	4	5	10
负极	石墨	51	60	63	-
	LTO ⁵	-	-	-	170
	铜	41	37	47	-
	炭黑	-	-	-	24
	PVDF	4	4	5	10
	电解液	六氟磷酸锂	9	6	8
碳酸乙烯酯		26	18	23	51
二甲基酸酯		26	18	23	51
隔膜	聚丙烯	6	6	8	35
	聚乙烯	1	1	1	-
壳体	聚丙烯	4	4	6	-
	铝	-	-	-	177
	钢	5	5	6	-
	玻璃纤维	1	1	1	-
冷却液	乙二醇 (EU-28)	3	3	4	35
BMS	晶体管 ⁶	2	2	2	14
	电阻器 ⁷	2	2	2	15
总计	电池	335	326	429	950
来源		[23, 26-28]	[26-28]	[26-28]	[16]

注: 1. 生产 1 kg LFP 产生 26 kg CO₂eq 和 0.06 kg SO₂eq^[27];

2. 生产 1 kg NCM 产生 36.8 kg CO₂eq 和 0.08 kg SO₂eq^[27];

3. 生产 1 kg LMO 需要产生 19.6 kg CO₂eq 和 0.045 kg SO₂eq^[27];

4. 聚偏氟乙烯 PVDF 用聚氯乙炔代替;

5. 生产 1 kg LTO 需要产生 18.3 kg CO₂eq^[16];

6. 生产 1 kg 晶体管需要消耗 0.047 MJ 电能^[23];

7. 生产 1 kg 电阻器需要消耗 2.66 MJ 电能^[23]。

当前纯电动汽车回收过程尚未完善, 此处采用金属材料回收来简化和代替回收过程, 其中各金属材料回收率与回收单位材料能源消耗见表 5。

2.5 面向 2030 年情景清单

本文主要通过考虑动力电池的能量密度、电池制造过程的能耗、正负极活性材料的碳排放、电力结构的变化以及未来车辆轻量化等因素的影响, 对 2030 年动力电池及 BEV 化石能源消耗与 GWP 进行

表2 纯电动汽车的原材料消耗数据^[23] 单位: %

材料	电机	电控	车身	底盘	流体
钢	36.2	5.0	68.7	80.4	-
铜	27.6	8.3	1.9	3.7	-
铝	36.2	47.5	0.8	2.6	-
铸铁	-	-	-	5.7	-
镁	-	-	0.1	-	-
塑料	-	23.0	17.4	3.0	-
橡胶	-	3.8	-	3.8	-
玻璃纤维	-	-	6.6	-	-
有机物	-	12.4	-	-	-
冷却液	-	-	-	-	39.3
制动液	-	-	-	-	6.8
添加剂	-	-	-	-	53.9
其他	-	-	4.5	0.8	-

表3 整车部件制造装配过程能耗^[25] 单位: MJ/kg

组件	电能	热能
动力电池	27	8.8
电动机	5.28	1.9
电控装置	1.38	-
主减速器	18.00	10.70
车身	3.43	-
底盘	1.39	0.42
流体	12.50	-
装配	6.86	2.03

表4 整车装配阶段能耗^[13] 单位: MJ/kg

类型	电能	热能
涂装	-	-
空气调节系统和照明	2.18	-
供暖	-	2.03
物料搬运	0.45	-
焊接	0.61	-
车间压缩空气	0.9	-

预测分析, 其中动力电池能量密度、电池制造过程的能耗、正负极活性材料的碳排放参数预测见表 6, 电力结构的变化见表 7。《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》提出, 到 2030 年纯电动乘用车轻量化系数将降低 20%, 此处将 BEV 整车整备质量降低 20%。

表 5 回收单位金属时各能源消耗及金属回收率^[26]

	钢	铸铁	铜	铝
回收率/%	90%	80%	90%	92%
天然气	0.02	-	-	0.15
电	4.23	2.24	9.54	0.80
煤	-	8.24	-	-

3 模型构建

本文模型搭建以目的为导向，基于 ADF(f) 与温室气体排放的评价指标，将动力电池与纯电动汽车生命周期评价模型分为 ADF(f) 评价模型和温室气体排放评价模型两部分。

3.1 ADP(f) 评价模型

为深入分析不同动力电池生产阶段及匹配不同动力电池纯电动汽车生命周期的 ADF(f) 与温室气体排放结果，本文将生命周期 ADF(f) 分为材料周期与能源周期两部分。

3.1.1 材料周期

材料周期主要包含材料加工与制造装配两部分。车用材料加工阶段的 ADF(f) 为：

$$E_{mat} = \sum_l \sum_h [(m_{ij})_{l \times s} \cdot (e_{1ij})_{s \times k}] \quad (1)$$

式中， m_{ij} 为第 i 个部件所包含的第 j 种材料； l 为动力系统零部件数量； s 为材料种类； e_{1ij} 为生产单位第 i 种能源所需要的第 j 种初级能源输入量； h 为初级能源的种类。

制造装配过程的 ADF(f) 为：

$$E_{man} = \sum_l \sum_h [(e_{2ij})_{l \times r} \cdot (e_{0ij})_{r \times k}] \quad (2)$$

式中， e_{0ij} 为能源生产过程中第 i 个组件所需的第 j 种能源量； e_{2ij} 表示制造装配过程中第 i 个组件制造装配过程所需的第 j 种能源量； l 为动力系统零部件数量； r 为能源种类数。

则材料周期总 ADF(f) 为：

$$E_M = E_{mat} + E_{man} \quad (3)$$

3.1.2 能源周期

能源周期的 ADF(f) 主要来源于车辆运行阶段的电能消耗。设 K 为 BEV 行驶总里程数，km， C 为汽车百公里公称电耗，kWh/100 km， e 为电能传输效率，则 BEV 能源周期的 ADP(f) 为：

$$E_{fuel} = \sum_h (3.5 \times K \times C/100e) \cdot (e_{0ij})_{r \times h} \quad (4)$$

全生命周期 ADP(f) 矩阵为：

$$E_{LCA} = E_{mat} + E_{man} + E_{fuel} \quad (5)$$

3.2 GWP 评价模型

生命周期全球变暖评价模型同样包含材料周期和燃料周期。

3.2.1 材料周期

构建材料加工阶段的温室气体排放矩阵：

$$P_{mat} = \sum_l [(m_{ij})_{l \times s} \cdot (p_{1ij})_{s \times k}] \quad (6)$$

式中， p_{1ij} 为生产单位第 i 种车用材料所排放的第 j 种温室气体排放当量； k 为温室气体排放当量类型。

构建制造装配阶段的温室气体排放矩阵：

$$P_{man} = \sum_l [(e_{2ij})_{l \times r} \cdot (p_{2ij})_{r \times k}] \quad (7)$$

式中， p_{2ij} 为生产单位第 i 种能源所排放的第 j 种污染物排放当量； k 为污染物排放当量的种类数。

3.2.2 燃料周期

构建能源生产的温室气体排放强度矩阵：

$$P_{fuel} = (3.5 \times K \times C/100e) \cdot (p_{3ij})_{r \times k} \quad (8)$$

式中， p_{3ij} 为生产单位第 i 种能源所排放的第 j 种污染物排放当量； k 为污染物排放当量的种类数。

则生命周期温室气体排放总值为：

$$P_{LCA} = P_{mat} + P_{man} + P_{fuel} \quad (9)$$

表 6 2030 年动力电池相关参数变化预测值^[27-29]

	电池质量/kg				制造阶段能耗/MJ		活性材料碳排放因子/kg CO ₂ eq				
	LFP	NCM	LMO	LTO	电能	天然气	LFP	NCM	LMO	LTO	石墨
2021	335	326	429	950	20	8.8	26	36.8	19.6	18.3	1.12
2030	253	248	326	570	10	5	20.8	29.4	15.7	14.6	0.9

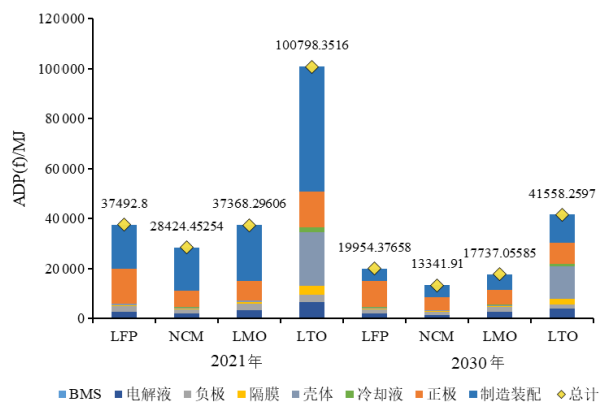
表7 2030年动力电池相关参数变化预测值^[30]

	煤电	水电	风电	核电	太阳能发电	其他
2021	71%	15%	4%	3%	2%	5%
2030	48%	18%	14%	8%	11%	1%

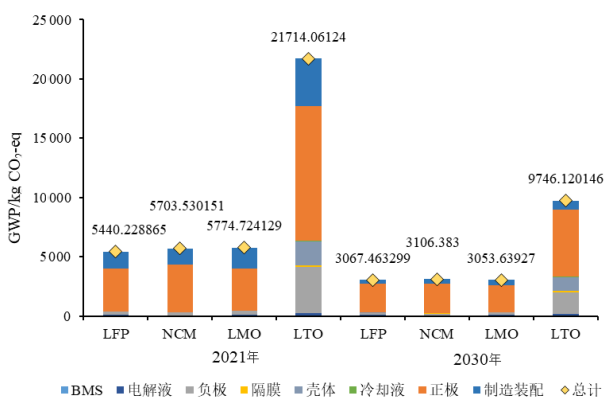
4 影响评价与结果解释

4.1 动力电池生产阶段对比分析

基于前文搭建的数学模型,利用GaBi软件中相关基础数据库与前文所述基础材料清单与2030年情景清单,可获得LFP、NCM、LMO、LTO4款不同类型动力电池在生命周期生产制造阶段ADP(f)与GWP结果。不同动力电池生产制造阶段2021年与2030年各部件ADP(f)与GWP如图2所示。



(a) ADP(f)



(b) GWP

图2 动力电池生产制造阶段ADP(f)与GWP

由图2可知,动力电池生产阶段ADP(f)与GWP排放值由大到小分别为LTO、LFP、LMO、NCM, LTO、LMO、NCM、LFP,即LTO电池生产中ADP(f)消耗与GWP的排放最高,分别为101 000 MJ、

21 700 kg CO₂-eq, NCM电池ADP(f)消耗最低,为28 400 MJ, LFP电池GWP排放最低,为5 440 kg CO₂-eq。主要是由于该动力电池质量相对较高,为其他电池的2~3倍,其金属材料含量较高,所以其在电池制造装配与壳体生产制造部分的ADP(f)最大;由图可知,4款动力电池在正极生产制造时具有较高的温室气体排放值,主要是因为动力电池正负极活性材料(LFP、NCM、LMO、LTO、石墨等)在生产过程中具有较高的碳排放因子。

在正负极活性材料碳排放因子降低、电力结构优化、动力电池轻量化等条件影响下,制造装配部分ADP(f)大幅下降(轻量化、电力结构),正极材料生产制造部分GWP大幅下降(电力结构、活性材料碳排放因子下降)。2030年,4款动力电池生产制造ADP(f)分别下降46.7%、53.2%、52.3%、58.8%,GWP分别下降43.6%、45.4%、47.1%、55.1%。

4.2 整车生命周期对比分析

基于前文搭建的数学模型,利用GaBi软件中相关基础数据库与前文所述基础材料清单与2030年情景清单,可获得匹配分别LFP、NCM、LMO、LTO四款不同类型动力电池的纯电动汽车全生命周期ADP(f)与GWP结果。不同BEV全生命周期2021年与2030年ADP(f)与GWP如图3所示。

由图3可知,整车生命周期能源消耗与温室气体排放LTO>LMO>LFP>NCM。受我国电力结构影响,匹配各动力电池在运行使用阶段环境排放与能源消耗占比最高(60%~70%),报废回收阶段产生约10%~20%的正效益。其中,匹配LTO电池的纯电动汽车在电池生产时产生较高ADP(f)与GWP,远超其他部件生产时的能耗与排放,而在匹配LFP、NCM、LMO等动力电池的纯电动汽车中,动力电池生产与整车其他部件生产的能耗与排放相近,可见动力电池生产能源消耗与碳排放具有较大占比,约占整车生产阶段的50%。

在正负极活性材料碳排放降低、电力结构优化、动力电池轻量化等条件影响下,2030年,LFP、NCM、LMO、LTO四款动力电池生产制造ADP(f)分别下

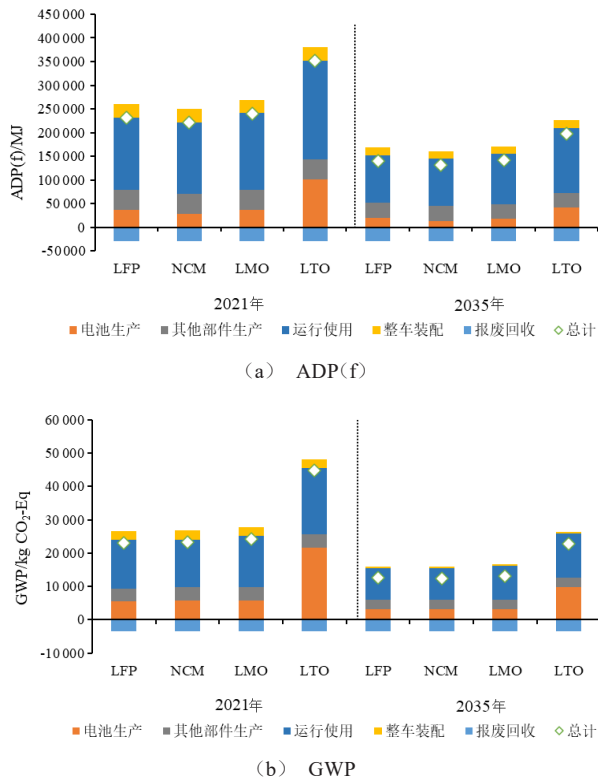


图3 匹配4款不同动力电池的整车生命周期ADP(f)与GWP
降 39.8%、40.7%、40.8%、43.9%，GWP 分别下降 45.5%、46.1%、46.1%、49.0%。

4.3 敏感性分析

4.3.1 电力结构

我国目前电力结构清洁能源发电比例较少，仍以火力发电为主，会产生一定的环境污染，不利于我国“双碳”目标下的减碳进程。

本文以我国电力结构为敏感性因子，设定用风力发电和太阳能发电来补充煤电比例降低所带来的缺口，提出3种改进的电力结构。在这3种改进的电力结构中，煤电的下降比例依次为10%，20%和30%，具体见表8。通过调节清洁能源发电和降低火力发电比例，以研究分析不同情景下匹配不同动力电池的纯电动汽车ADP(f)与GWP，具体情境下匹配4款动力电池的BEV各组成部分ADP(f)与GWP如图4所示。

由图4可知，通过降低煤电比例，增强风电、太阳能等清洁能源发电比例，匹配4种动力电池的

表8 当前及改进后的电力结构

电力结构	基础情景	情景1	情景2	情景3
煤电	71%	61%	51%	41%
水电	15%	15%	15%	15%
风电	4%	9%	14%	19%
太阳能发电	2%	7%	12%	17%
核电	3%	3%	3%	3%
其他	5%	5%	5%	5%

纯电动汽车全生命周期能耗与排放逐步降低。主要是由于我国火力发电模式中所消耗的能源为煤炭等化石能源，电量需求越高，ADP(f)则越高，同时煤炭等化石能源燃烧将会排放大量污染物。随着火力发电比例降低10%、20%、30%，匹配不同动力电池的整车ADP(f)将随之降低18%~20%、27%~30%、48%~57%；温室气体排放将随之降低12%~20%、20%~30%、27%~41%。其中匹配NCM电池的纯电动汽车ADP(f)下降最高，匹配LFP电池的纯电动汽车GWP排放下降最多，匹配LTO电池的纯电动汽车ADP(f)与GWP下降相对较低。

4.3.2 充电效率

动力电池在使用过程中受电池充电效率影响，将会对整车运行使用阶段的电量损耗具有较大影响。本文针对动力电池充电效率进行敏感性分析，量化分析随着充电效率提升90%、95%、98%，不同情景下匹配不同动力电池的纯电动汽车ADP(f)与温室气体排放变化，具体情境下不同BEV各组成部分ADP(f)与GWP如图5所示。

由图5可知，通过充电效率的提升，纯电动汽车全生命周期的ADP(f)与GWP均有一定程度降低。当动力电池充电效率提升至98%时，动力电池ADP(f)将降低6%~7%，GWP将降低4%~6%。其中，匹配NCM电池的纯电动汽车ADP(f)降幅最大，匹配LMO电池的纯电动汽车GWP降幅最大，而匹配LTO电池的纯电动汽车对充电效率的敏感性相对较低。

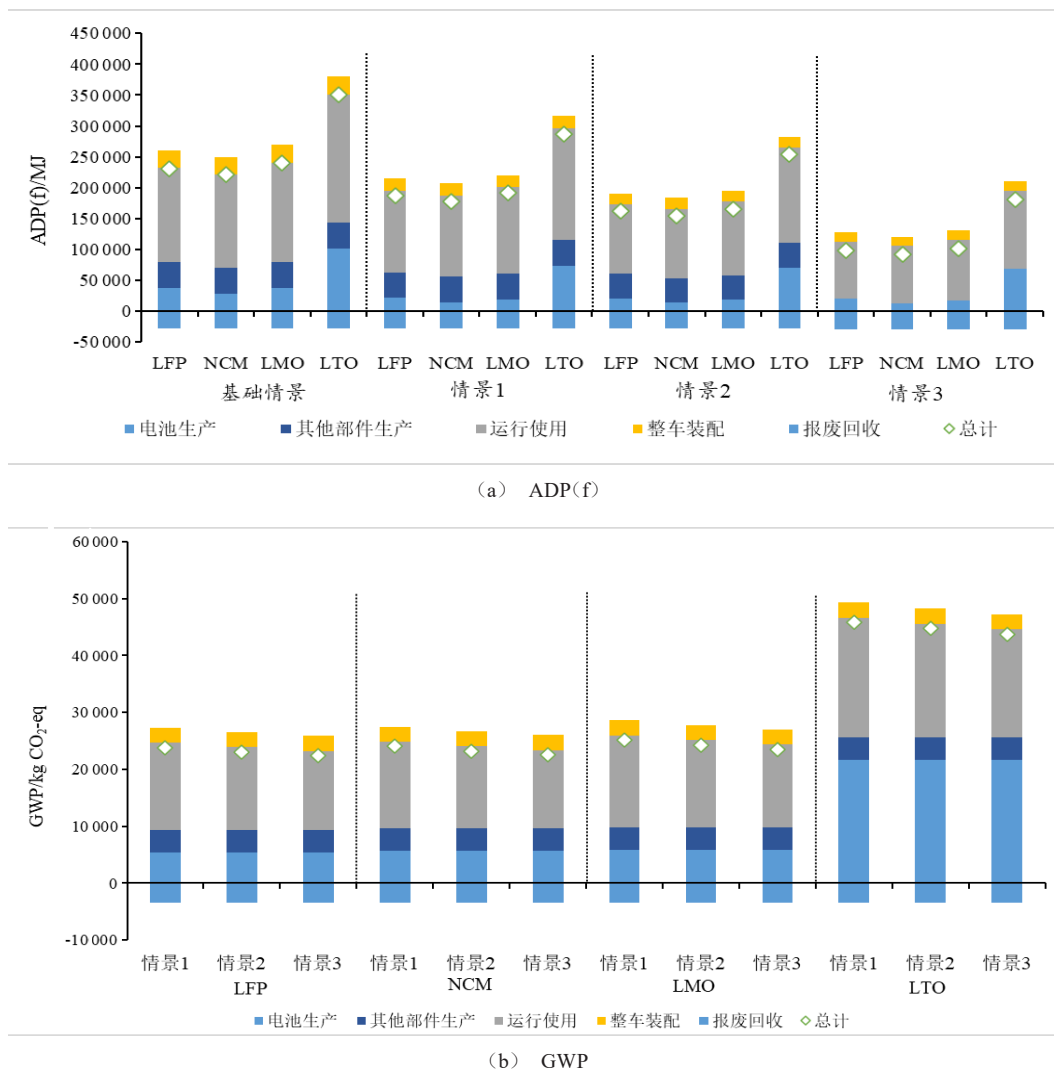


图4 不同电力结构下匹配4款不同动力电池的整车生命周期ADP(f)与GWP

5 结论

以生命周期评价体系与理论方法为基础,搭建纯电动汽车全生命周期数学模型,进而运用GaBi工具对匹配不同类型动力电池的纯电动汽车在2021与2030年的ADP(f)与温室气体排放结果进行对比研究并选取电力结构与充电效率为敏感性因子进行敏感性分析,以测算其对BEV生命周期能耗与排放的影响程度。最终数据分析结果表明:

(1) 动力电池生产制造过程中,由于其电池质量本身较高,所以LTO电池具有最高的ADP(f)与GWP,而具有高碳排放因子的正负极材料为动力电池生产阶段带来了大量的温室气体排放,所以具有

较高的GWP,电池制造装配阶段的电能损耗则为电池生命周期带来大量的ADP(f)。

(2) 匹配不同动力电池纯电动汽车生命周期化石能源消耗LTO>LMO>LFP>NCM,全球变暖潜值LTO>LMO>NCM>LFP,各BEV运行使用阶段环境排放与能源消耗占比最高(60%~70%),报废回收阶段产生约10%~20%的正效益,其中动力电池生产制造在整车生产制造中拥有较高的环境排放与能耗(40%~70%)。

(3) 至2030年,随着我国电力结构调整、材料轻量化、正负极活性材料碳排放因子的降低,匹配不同电池纯电动汽车ADP(f)将降低40%~44%,GWP将下降45%~49%,且通过敏感性分析可知,

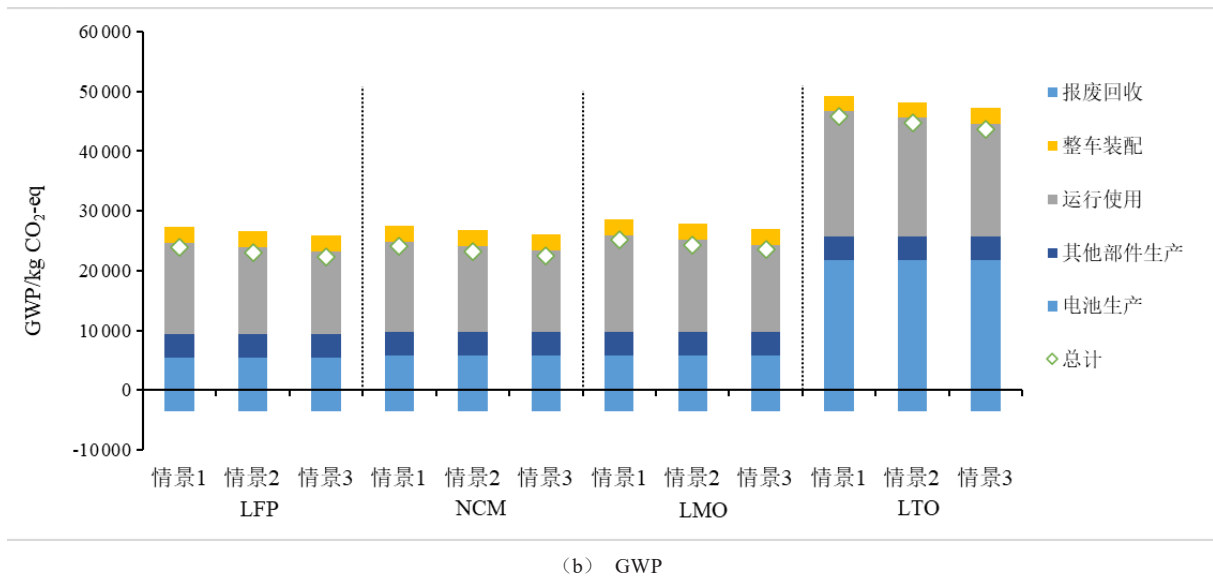
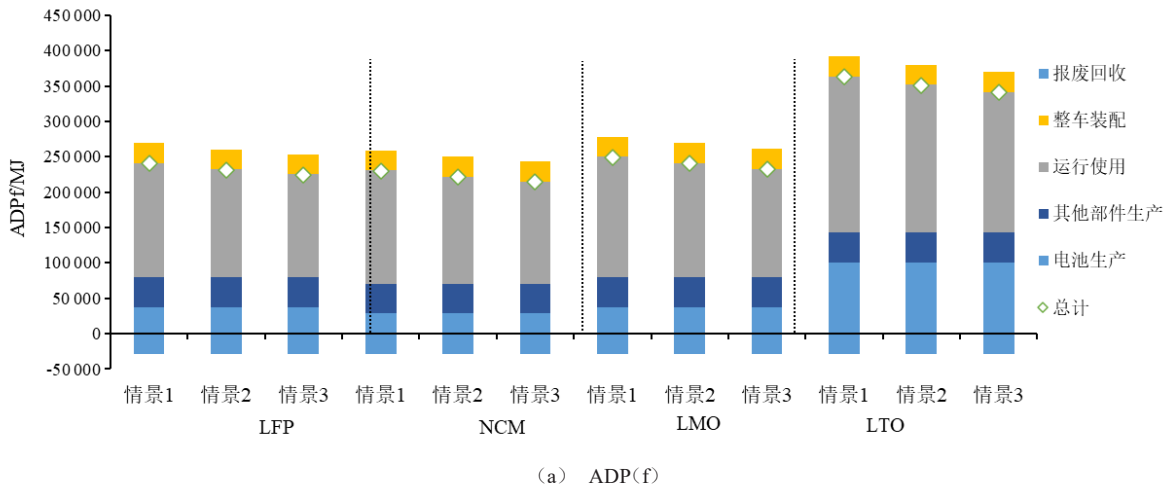


图 5 不同充电效率下匹配 4 款不同动力电池的整车生命周期 ADP(f) 与 GWP

我国电力结构的优化与充电效率的提高均能有效改善 BEV 生命周期内能耗与排放，且电力结构的优化改善效果更为明显。

(4) 未来将聚焦动力电池上游锂离子来源与下

游动力电池梯次利用与报废回收等场景，全面链接纯电动汽车全生命周期，并对其相关能耗与排放研究。

参考文献 (References)

[1] SHU Xiong, GUO Yingfu, YANG Wenxian, et al. Life-Cycle Assessment of the Environmental Impact of the Batteries Used in Pure Electric Passenger Cars [J]. Energy Reports, 2021, 7: 2302-2315.

[2] AMBROSE H, KENDALL A. Understanding the Future of Lithium: Part 2, Temporally and Spatially Resolved Life-Cycle Assessment Modeling [J]. Journal of Industrial Ecology, 2020, 24(1): 90-100.

[3] ELLINGSEN L, MAJEAU-BETTEZ G, SINGH B, et al. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack [J]. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18(1): 113-124.

[4] DAI Qiang, KELLY J C, GAINES L, et al. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Appli-

- cations[J]. Batteries, 2019, 5(2): 48.
- [5] PETERSAC J F, WEIL M. Providing a Common Base for Life Cycle Assessments of Li-Ion Batteries [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171(10): 704-713.
- [6] SUN Xin, LUO Xiao Li, ZHANG Zhan, et al. Life Cycle Assessment of Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide (NCM) Batteries for Electric Passenger Vehicles [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273(10): 123006.
- [7] ACCARDO A, DOTELLI G, MUSA M L, et al. Life Cycle Assessment of an NMC Battery for Application to Electric Light-Duty Commercial Vehicles and Comparison with a Sodium-Nickel-Chloride Battery [J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(3): 1160.
- [8] AHMADI L, YOUNG S B, FOWLER M, et al. A Cascaded Life Cycle: Reuse of Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Packs in Energy Storage Systems [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22(1): 111-124.
- [9] CHEN Mengyuan, MA Xiaotu, CHEN Bin, et al. Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries [J]. Joule, 2019, 3(11): 2622-2646.
- [10] 贾志杰, 高峰, 杜世伟, 等. 磷酸铁锂电池不同应用场景的生命周期评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1975-1984.
- JIA Zhijie, GAO Feng, DU Shiwei, et al. Life Cycle Assessment of Different Application Scenarios of Lithium-Iron Phosphate Batteries [J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1975-1984. (in Chinese)
- [11] LOAKIMIDIS C S, MURILLO-MARRODÁN A, BAGHERI A, et al. Life Cycle Assessment of a Lithium Iron Phosphate (LFP) Electric Vehicle Battery in Second Life Application Scenarios [J]. Sustainability, 2019, 11(9): 2527.
- [12] ZHU Lingyun, CHEN Ming. Development of a Two-Stage Pyrolysis Process for the End-of-Life Nickel Cobalt Manganese Lithium Battery Recycling from Electric Vehicles [J]. Sustainability, 2020, 12(21): 1-14.
- [13] 刘书如. 锂离子动力电池及纯电动汽车生命周期评价对比研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- LIU Shuru. Comparative Study on Life Cycle Assessment of Li-Ion Power Battery and Pure Electric Vehicle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [14] RICHA K, BABBITT C W, NENADIC N G, et al. Environmental Trade-offs Across Cascading Lithium-Ion Battery Life Cycles [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22(1): 66-81.
- [15] 李响, 李柏姝. 电动汽车锂电池生命周期环境效益评价[J]. 沈阳理工大学学报, 2021, 40(5): 90-94.
- LI Xiang, LI Baishu. Life Cycle Environmental Benefit Evaluation of Lithium Batteries for Electric Vehicles [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2021, 40(5): 90-94. (in Chinese)
- [16] 殷仁述, 杨沿平, 杨阳, 等. 车用钛酸锂电池生命周期评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2371-2381.
- YIN Renshu, YANG Yanping, YANG Yang, et al. Life Cycle Assessment of the Lithium Titanate Batteries Used for Electric Vehicles [J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2371-2381. (in Chinese)
- [17] YUDHISTIRA R, KHATIWADA D, SANCHEZ F. A Comparative Life Cycle Assessment of Lithium-Ion and Lead-Acid Batteries for Grid Energy Storage [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 358: 131999.
- [18] MARQUESA P, GARCIA R, KULAY L. Comparative Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Addressing Capacity Fade [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 22: 787-794.
- [19] OLIVEIRA L, MESSAGIE M, RANGARAJU S, et al. Key Issues of Lithium-Ion Batteries—from Resource Depletion to Environmental Performance Indicators [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 108, Part A: 354-362.
- [20] QUAN Jiawei, ZHAO Siqi, SONG Duanmei, et al. Comparative Life Cycle Assessment of LFP and NCM Batteries Including the Secondary Use and Different Recycling Technologies [J]. Science of the Total Environment, 2022, 819: 153105.
- [21] ISO 14040. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework [S]. 2006.
- [22] XIA Xiaoming, LI Pengwei. A Review of the Life Cycle Assessment of Electric Vehicles: Considering the Influence of Batteries [J]. Science of the Total Environment, 2022, 814: 152870.
- [23] 马金秋. 匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- MA Jinqiu. Life Cycle Assessment on a Specific BEV with Different Power-Batteries [D]. Xi'an: Chang'an

- University, 2019. (in Chinese)
- [24] 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 等. 氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比[J/OL]. 环境科学: 1-15. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202110178>.
- CHEN Yisong, LAN Libo, HAO Zhuo, et al. Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison Research of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power System [J/OL]. Environmental Science: 1-15. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202110178>. (in Chinese)
- [25] 许海波. 增程式电动汽车全生命周期评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- XU Haibo. Life Cycle Assessment of Extended Range Electric Vehicle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [26] HAO Han, MU Zhexuan, JIANG Shuhua, et al. GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China [J]. Sustainability, 2017, 9 (4): 504-515.
- [27] 汪祺. 基于生命周期评价的锂电正极材料对比分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- WANG Qi. Cathodes Materials of Lithium Ion Battery Comparative Analysis Based on Life Cycle Assessment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [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.
- LI Shuhua. Life Cycle Assessment and Environmental Benefits Analysis of Electric Vehicles [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [29] MATS Z, LARS A, JESSICA O. Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles—Critical Issues [J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 18(15): 1519-1529.
- [30] 电力规划设计总院. 中国电力发展报告(2020) [R]. 北京: 电力规划设计总院, 2020.
- China Electric Power Planning & Engineering Institute. China Electric Power Development Report (2020) [R]. Beijing: China Electric Power Planning & Engineering Institute, 2020. (in Chinese)

作者简介



陈轶嵩(1988-), 男, 陕西周至人, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源汽车生命周期评价、汽车产业规划与政策分析。

Tel: 17791263276

Email: chenysisong_1988@163.com

通信作者



付佩(1994-), 女, 陕西西安人, 博士, 工程师, 主要研究方向为燃料电池设计与优化。

Tel: 15686012518

E-mail: peifu@chd.edu.cn