

联合国全球契约组织GDI for SDG系列报告

——践行全球发展倡议，加速实现可持续发展目标

动力电池碳足迹及 低碳循环发展白皮书



United Nations
Global Compact

知识合作伙伴



© 2023

联合国全球契约组织

“企业践行全球发展倡议，加速实现可持续发展目标”
(GDI for SDG) 试点项目报告

知识合作伙伴

远景能源、远景智能、远景动力

参编机构

中国汽车动力电池产业创新联盟
中国交通运输部科学研究院
中国机电产品进出口商会
中国化学与物理电源行业协会
欧阳明高院士工作站
深圳市计量质量检测研究院（粤港澳大湾区碳足迹创新技术委员会）
环球零碳
(排名不分先后)

鸣谢

在该项研究开展的过程中，多家企业为报告提供了宝贵的建议和先进案例。

项目组感谢以下企业：

天齐锂业股份有限公司^P
宝马集团^P
宁德时代新能源科技股份有限公司^P
格林美股份有限公司^P

^P 代表截至2023年10月31日，该企业为联合国全球契约组织成员。

^{SBTi} 代表截至2023年10月31日，该企业的科学碳目标已获批。

目录

企业践行全球发展倡议， 加速实现可持续发展目标

背景介绍

1.1 新能源汽车增长带动动力电池产量激增	5
1.2 政策及市场双轮驱动，电池碳足迹正逐渐成为全球贸易的焦点之一	8
1.3 电池回收关注度日渐高涨	9
1.4 研究目的及意义	10

电池特性与制造工艺

2.1 电池性能比较	12
2.2 工艺流程	13
2.3 电池各部件质量占比	14

电池全生命周期评价方法

3.1 全生命周期评价方法介绍	16
3.2 电池生命周期阶段介绍	18
3.3 全生命周期评估界限与范围	20
3.4 数据来源	21

电池生命周期碳排放分析

4.1 电池包碳足迹分析	23
4.1.1 不同技术类型电池包跨期碳足迹比较	23
4.1.2 不同技术类型电池包跨生命周期阶段碳足迹比较	24
4.2 电池电芯碳排放热点分析	26
4.2.1 正极	26
4.2.2 负极	28

电池碳减排潜力探索

5.1 能源结构	31
5.2 电池设计及包装	32
5.3 技术路径	34
5.4 电池回收	35
5.4.1 回收方法及流程	35
5.4.2 回收方式碳排放评价	39
5.4.3 企业回收行动	40
5.5 企业案例	44

总结与建议

6.1 总结	47
6.2 建议	48

发展形势与展望

7.1 新能源汽车碳中和发展目标明确，动力电池碳足迹管理与碳减排是当前关键任务之一	50
7.2 政府和企业亟需构建碳足迹管理体系，相关核算标准、方法论等跨国互认也是未来趋势	50
7.3 跨国头部企业挑战与机遇并存，新型商业合作新模式或随之出现	52

联合国可持续发展17 项目标

联合国全球契约十项原则

企业践行全球发展倡议，加速实现可持续发展目标

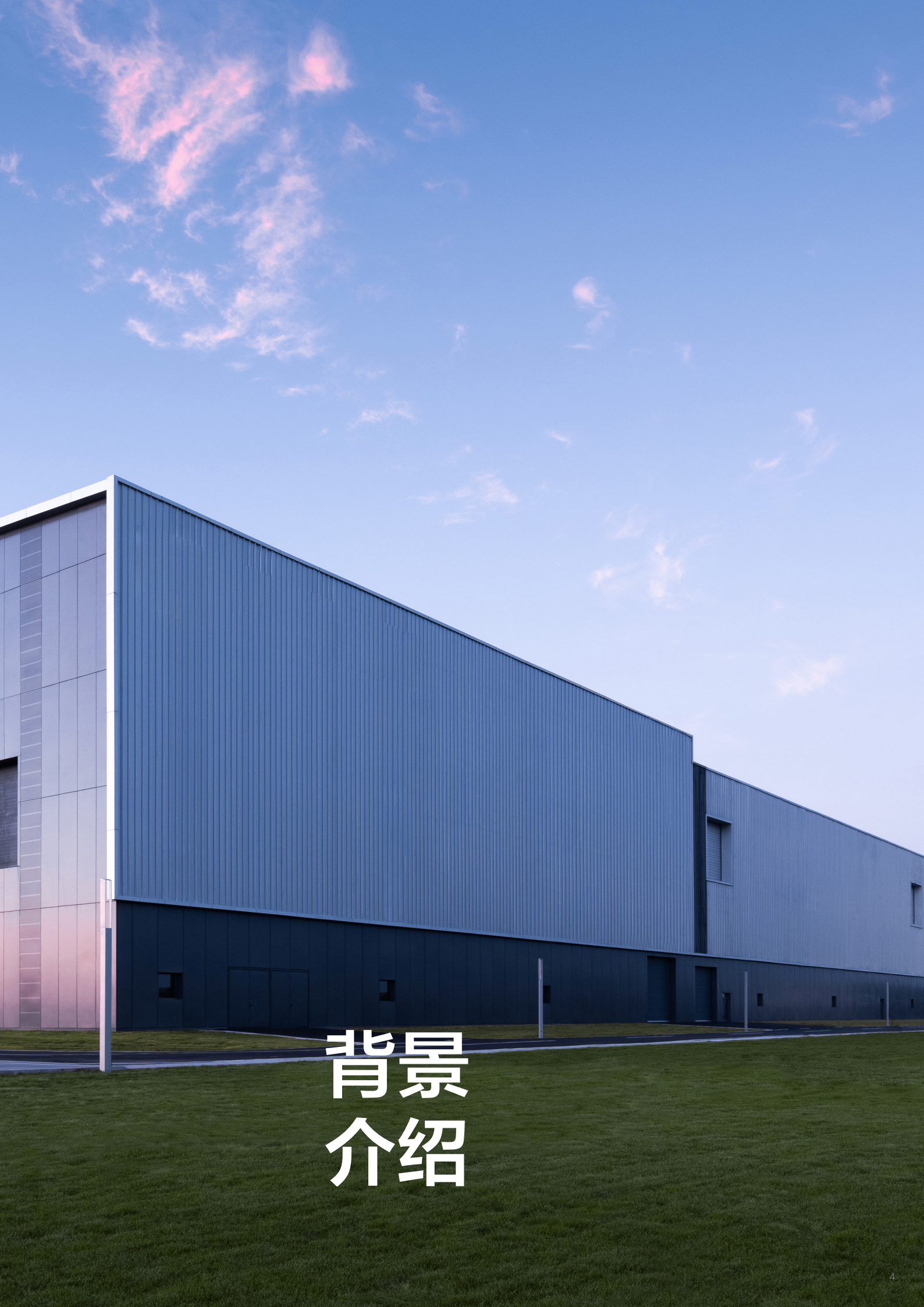
当前，地缘政治冲突频现，不确定性持续上升，联合国呼吁各国以气候等迫在眉睫的全球性问题为突破口，加强国际合作（联合国事务，2021）。在此背景下，中国国家主席习近平于2021年9月21日在第七十六届联合国大会一般性辩论上提出全球发展倡议，为推动国际社会形成合力，破解发展赤字难题，实现联合国2030年可持续发展议程贡献中国方案和中国智慧。全球发展倡议就减贫、粮食安全、抗疫和疫苗、发展筹资、气候变化和绿色发展、工业化、数字经济、数字时代互联互通等八大重点领域提出合作设想和方案（中国外交部，2022）。100多个来自欧盟、东南亚国家联盟和非洲联盟的国家表示支持全球发展倡议，五大洲50多个国家加入了“全球发展倡议之友小组”（中国外交部，2022）。全球发展倡议得到了联合国秘书长安东尼奥·古特雷斯，以及包括联合国全球契约组织、联合国开发计划署、联合国经济和社会事务部、联合国粮食及农业组织、联合国工业发展组织等在内的联合国机构的支持（中国外交部，2022）。联合国秘书长古特雷斯在于2022年5月9日在纽约联合国总部举行的“全球发展倡议之友小组”高级别视频会议上发表视频致辞时说：“我们正快速接近实现可持续发展目标进程的中间点，但却遭遇挫折，我们必须也能够做得更好。”他认为，围绕全球发展倡议开展的讨论可以带来显著变化，促进各国在发展领域取得进展。中国政府将落实全球发展倡议的重要举措包括创设“全球发展和南南合作基金”，加大对中国—联合国和平与发展基金的投入，成立全球发展促进中心等（中国外交部，2022）。

气候变化和绿色发展是全球发展倡议八大重点领域之一，直接影响人类赖以生存和发展的基本要素，如粮食安全和住房安全等。在全球开展跨部门跨行业气候合作有助于大力推动构建更美好的社会。

联合国全球契约组织于2022年6月在联合国全球契约组织领导人峰会期间面向全球官方发布了《中国战略》，确定了七大重点工作领域，包括应对气候变化、缩小不平等、促进体面劳动、集体行动反对腐败、支持参与“一带一路”倡议的企业加速实现可持续发展目标、通过中非企业可持续发展合作加强“南南合作”、依托“全球发展倡议”促进商业创新和可持续发展目标伙伴关系。与此同时，中国战略确定的多项举措将更好、更快地帮助中国企业在实现零碳、公正转型、可持续供应链等诸多方面形成积极的集体影响力，从而加速推动《巴黎协定》和《2030可持续发展议程》在中国和全球的落实。联合国全球契约组织于2022年发起“企业践行全球发展倡议，加速实现可持续发展目标”（GDI for SDG）试点项目，旨在通过搭建跨部门合作伙伴关系，采取全价值链思维，促成不同行业部门之间的相互协作以及资源和能力整合，探索和落地在环境气候和财务两个维度均可可持续的商业模式，从项目落地、思想引领、活动对话等多个维度，加速探索、实践和推广涵盖零碳转型、减塑行动、循环经济、海洋生态、产业创新等全球性议题的解决方案。2022年11月5日，在第五届虹桥国际经济论坛“践行全球发展倡议，建设世界一流企业”平行论坛上，联合国全球契约组织正式发起GDI for SDG一期试点项目，旨在“携手缓解海洋塑料污染，团结助力低碳经济转型”，并从循环塑料的跨行业商业再利用和社会全域回收体系两个方向同时推进。13家创始成员包括：3M、阿里巴巴、中国节能环保集团、厦门航空、达能、荣耀、联想、美宝国际、诺维信、百事、康师傅控股、陶朗和国际竹藤组织。随后，安踏、太平洋财险等企业也相继加入。GDI for SDG一期试点项目将持续向多领域、多区域深入推进，务实落地更多的基于创新的跨行业合作成果落地。

2023年8月，联合国全球契约组织启动GDI for SDG二期试点项目，携手企业、政府、智库等在内的多相关方推动新能源动力电池循环经济发展，并于9月14日在中国辽宁省沈阳市召开首次项目研讨会。在应对气候危机的进程中，交通运输部门是温室气体排放的最大来源之一。值得欣慰的是，电动汽车产业在全球范围内蓬勃发展，并被视为解决温室气体排放增加问题的重要方案之一。就全球范围而言，电动汽车在中国、欧洲和美国等主要市场起步较早，发展迅猛，这将为广大发展中国家更广泛地采用电动汽车提供了强有力的经济案例参考。同时，电动汽车行业将在新兴市场释放更大的发展潜力，这将不仅仅体现在环境和气候层面，还涵盖经济与社会维度，比如：提供更多的新型就业机会、激发传统产业创新、加速基础设施建设进程等等。由此可见，电动汽车行业的绿色、低碳及韧性发展对于加速推动2030可持续发展议程以及实现《巴黎协定》目标十分重要。

该白皮书报告将聚焦新能源动力电池行业全价值链上的多重利益相关方以及其行动实践，从全生命周期角度对动力电池的回收、再利用和处置进行分析研究，并通过企业案例为企业和相关方提供实践参考，从而推动低碳循环经济的可持续发展。企业通过践行全球发展倡议，以务实行动为导向，创新为驱动力，携手推动气候行动和绿色发展，并为可持续发展目标（SDGs）的加速实现作出积极贡献。联合国全球契约组织作为世界上最大的推进企业可持续发展的国际组织，将持续团结全球企业，发挥引领作用，动员更多的不同行业企业参与GDI for SDG项目中来，积极推动2030可持续发展议程。



背景 介绍

1.1 新能源汽车增长带动动力电池产量激增

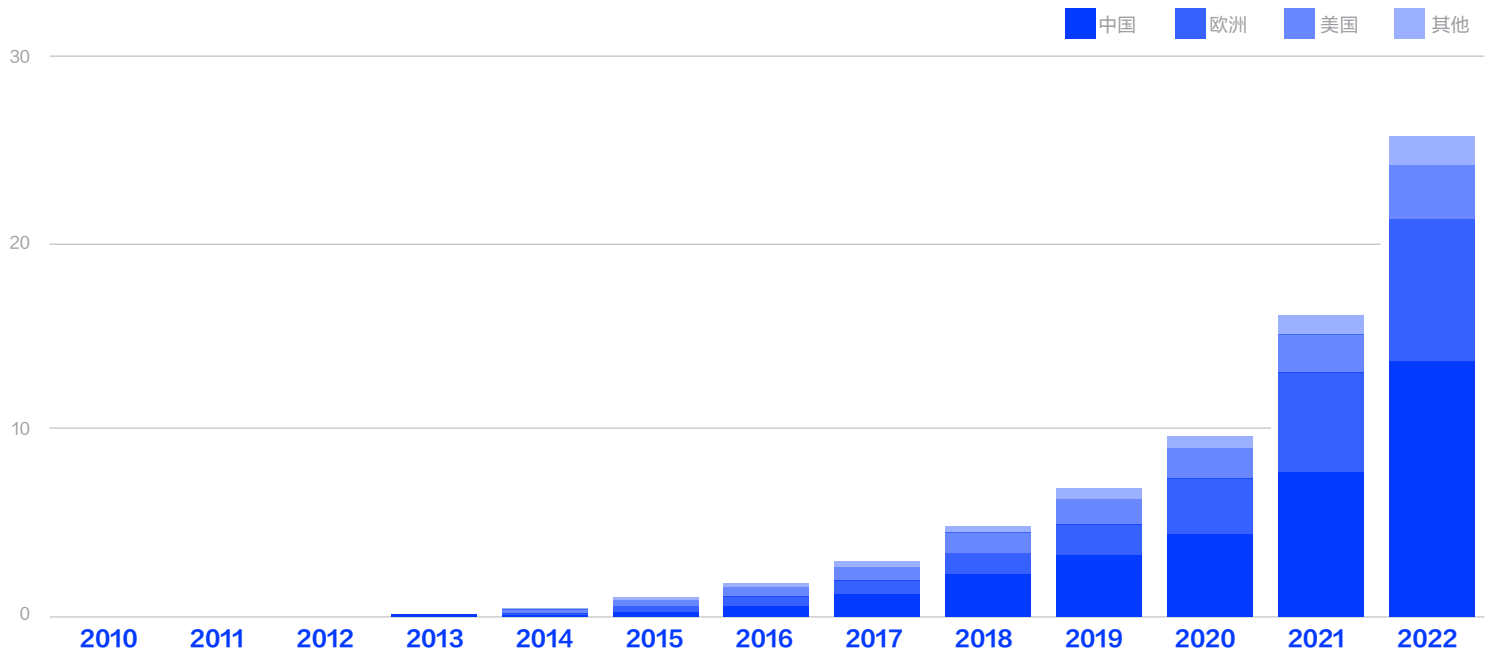
交通运输是全球空气污染的主要来源之一。根据国际能源署（IEA）数据，交通运输使用的能源91%来自石化产品，其消耗产生尾气污染，造成大量的二氧化碳（CO₂）排放。2021年交通运输产生的CO₂增长至77亿吨，约占全球CO₂排放总量的21%¹。

交通运输部门脱碳，对于实现《巴黎协定》提出的温控目标十分重要。通过大力推广电能驱动的电

动汽车，替代传统内燃机为驱动的燃油车可有效减少交通运输产生的CO₂排放。

以电动汽车为主的新能源汽车已成为世界各国汽车产业发展的趋势，各国正大力发展电动汽车，以迅速推动交通系统向清洁交通系统转变。全球电动车销售量呈现高速增长态势，2022年全球电动汽车总数达到2600万辆，与2021年相比增长了60%²（见图1）。欧洲新能源车也呈现快速增长的趋势。根据欧洲汽车制造商协会（ACEA）的数据，2020年欧洲新能源汽车销量达到了137.4万辆，同比增长117%。中国新能源汽车市场总量居于国际领先地位，自2015年起保有量保持全球第一，2022年中国新能源汽车保有量约1310万辆，占汽车总量的4.10%³。

插电式混动和纯电动汽车保有量（百万辆）
来源：IEA⁴（图1）



¹“Transport” (Paris: IEA, 2022), <https://www.iea.org/reports/transport>.

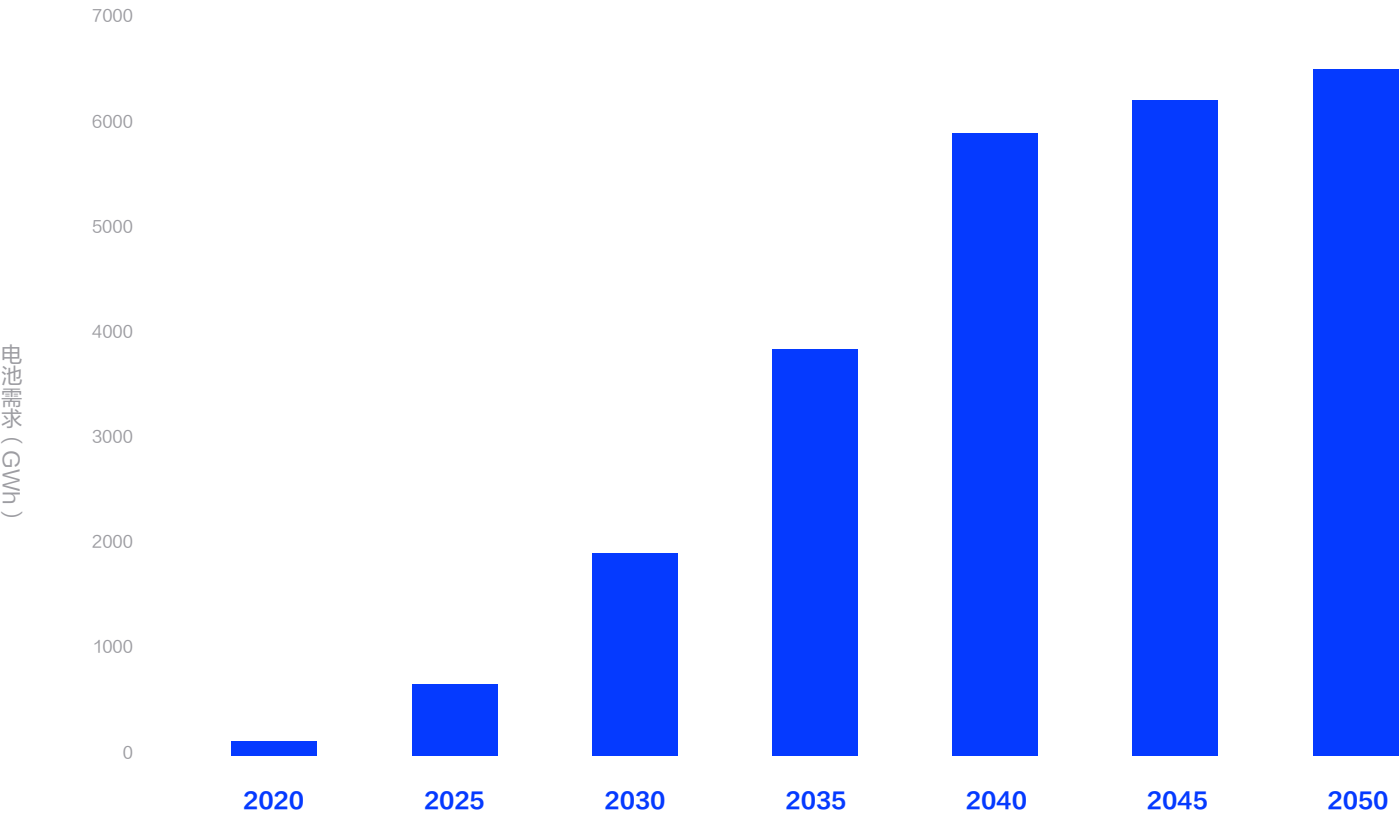
²Roland Irlle, “Global EV Sales for 2022,” accessed March 2, 2023, <https://www.ev-volumes.com/>.

³ 经济参考报, “2022年我国新能源汽车保有量同比增长近七成,” n.d., http://www.jjckb.cn/2023-01/12/c_1310689914.htm.

⁴“Global EV Outlook 2023”(IEA, n.d.), <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>.

动力电池作为新能源汽车的核心部件，在新能源汽车发展过程中起到关键性作用。在交通部门电气化转型，新能源汽车增速迅猛的情况下，全球对动力电池的需求也在逐步攀升。根据Statista预测（如图2），预计2050年动力电池需求量将达到6530吉瓦时（GWh），约为2020年的600倍。

2020-2050年全球电动汽车
电池需求预测⁵（图2）



中国是动力电池生产制造大国。自2014年全球新能源汽车进入快速发展阶段以来，中国动力电池行业出货量高速增长。据锂电行业研究机构高工产研锂电研究所（GGII）数据显示，2022年中国动力电池出货量480GWh，同比增长超1倍⁶。中国动力电池的装车量近年来也呈现出逐步提升的趋势，2021年达到154.5GWh⁷。

在车载电池中，锂离子电池以其能量密度高、循环寿命长等特点成为新能源车使用的主要动力电池类型，在减少道路交通排放方面发挥着核心作用。其中磷酸铁锂电池（LFP）和三元电池（NCM）分别以其成本竞争优势和较高的能量密度优势，占据市场主导地位。

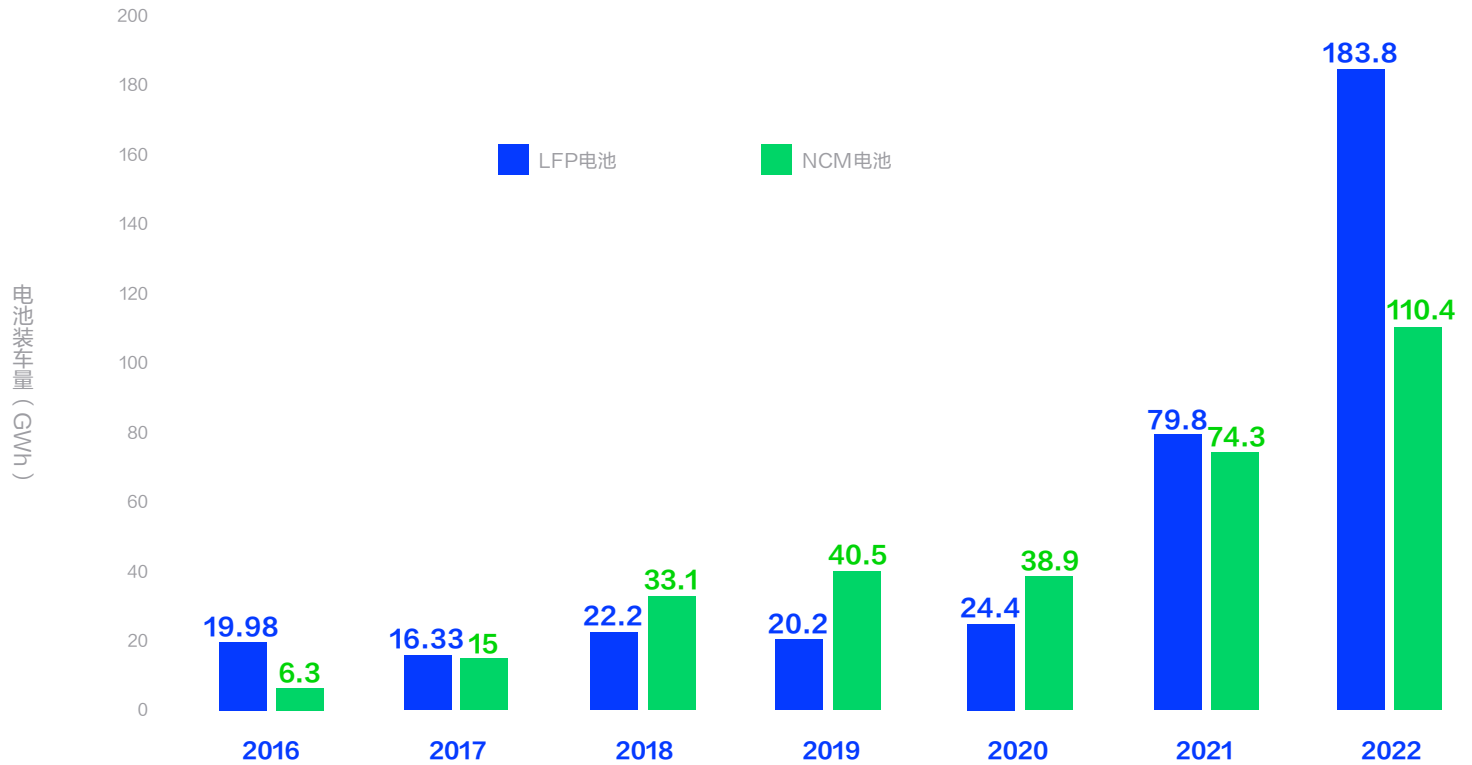
LFP和NCM电池的市场份额对比随时间发生转变。2016年以来NCM电池的市场份额快速增长，2016年至2018年中国80%以上的电动乘用车使用NCM电池，2020年NCM电池装车车辆达到38.9GWh；2021年后，LFP装车量超过NCM，2022年中国动力电池累计装车量294.6GWh，同比增长90.7%，其中，LFP累计装车量183.8GWh，占总装车量的62.4%。

⁵ “Statista, 2021, Forecasted Demand for Electric Vehicle Batteries Worldwide from 2020 to 2050,” accessed December 12, 2022, <https://www.statista.com/statistics/1129463/forecasted-electric-vehicle-battery-demand-worldwide/>.

⁶ “GGII: 2022年中国锂电池出货量超650GWh,” accessed March 2, 2023, <https://www.gg-lb.com/art-45913.html>.

⁷ 智研咨询-产业研究, “2021年中国动力电池回收现状分析: 装车量走高, 未来面临较大退役规模,” April 19, 2022, https://blog.csdn.net/m0_68724905/article/details/124267904.

LFP和NCM电池装车量 (GWh) ⁸
(图3)

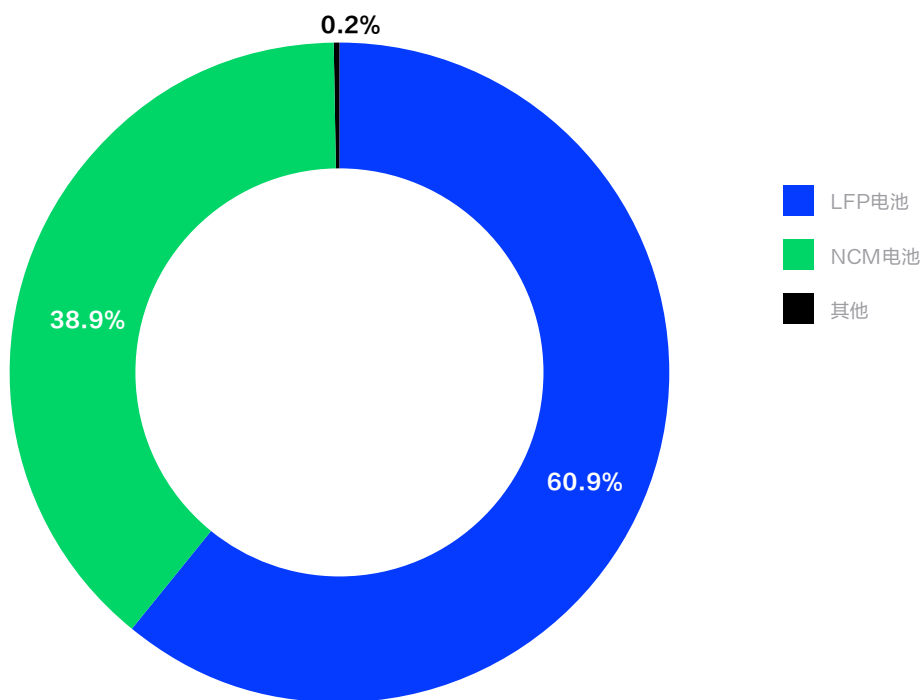


⁸ 俞立严: “性能提升拉动装车量 LFP电池‘跑赢’NCM电池,” 上海证券报, August 20, 2022.

根据中国汽车动力电池产业创新联盟数据, 2022年中国动力电池累计产量545.9GWh, 其中NCM电池累计产量212.5GWh, 占总产量38.9%; LFP电池累计产量332.4GWh, 占总产量60.9%。根据Mordor Intelligence 的报告, 2022年欧洲动力电池市场的装机量为233.4GWh, 预计到2028年将达到438.4GWh, 其中LFP因其高安全性、低成本和高循环寿命而受到欧洲汽车制造商的青睐, 而NCM则因其高能量密度、高功率密度和高稳定性而受到欢迎。



2022中国各类动力电池累计产量占比



来源：中国汽车动力电池产业创新联盟

1.2 政策及市场双轮驱动，电池碳足迹正逐渐成为全球贸易的焦点之一

尽管电动汽车在行驶阶段产生的直接排放量几乎为零，但其主要动力来源电池，在其生产和制造过程伴随着大量能源消耗，加之动力电池生产和使用的快速增长带来了资源短缺和能源消耗的问题，也会导致显著的温室气体排放和环境影响，所以需要格外关注电池生命周期各阶段的碳排放。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是从定量和定性两方面分析不同产品生命周期过程对环境影响的方法，综合评定产品生命周期过程中的温室气体排放、水资源消耗、能源消耗等方面对环境的影响。

随着电动汽车的快速增长和国际社会对全球气候变暖问题的关注，电池全生命周期的碳排放正成为各国政府、企业和研究机构关注的焦点。一些国家正在逐步将产品生命周期评估和碳足迹纳入国际绿色贸易的必要考虑因素。产品碳足迹(Carbon Footprint of Products, CFP)是LCA中环境影响评价的一种，是衡量某产品在其生命周期中直接或间接产生的温室气体排放量。

如欧盟针对出口到欧盟的汽车电池制定碳足迹限值法规。2022年12月9日，欧盟委员会同意欧洲议会和欧洲理事会发布新电池《欧盟电池与废电池法规》提案(COM 2020/798 final)，并于2023年1月18日达成三方最终协议，8月17日，正式生效，该法案贯穿电池从原材料、制造、消费到回收成新产品的整个生命周期。《欧盟电池与废电池法规》要求，容量超过2kWh的可充电工业电池、轻型运输工具电池、电动汽车电池、汽车SLI电池和便携式电池，必须提供碳足迹声明和标签，以及电池数字护照，以披露包括容量、性能、用途、化学成分、可回收内容物等信息。法案要求2025年2月，在欧盟成员国上市或投入使用的电动汽车电池必须提供碳足迹声明，2026年8月起必须标识碳足迹性能等级标签，2028年2月，欧盟会对电动汽车电池设定最大排放阈值。

绿色贸易限制加大了世界各国动力电池产业对于出口产品碳足迹的关注。做好产品碳足迹核算、全生命周期碳排放管理进而降低产品碳足迹，不仅是企业应对绿色贸易壁垒对企业出口的紧迫要求，也会是企业增强其产品竞争力、获得更多下游买家及消费者青睐的必要手段。

1.3 电池回收关注度日渐高涨

⁹ Anders Nordelöf et al., “Environmental Impacts of Hybrid, Plug-in Hybrid, and Battery Electric Vehicles—What Can We Learn from Life Cycle Assessment?,” The International Journal of Life Cycle Assessment 19, no. 11 (2014): 1866–90.

¹⁰ 罗锦程；闫景武；邓毅；陈曾思澈；徐紫寅；韩帅帅，“我国动力电池碳足迹核算体系的问题及对策,” 中国环境科学学会2022年科学技术年会--环境工程技术创新与应用分会论文集（四）, 2022,969–72,https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2022.042846.

¹¹ Mengyuan Chen et al., “Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries,” Joule 3, no. 11 (2019): 2622–46.

¹² “一年20万吨！首批电动车电池迎来退役潮，旧电池何去何从？,” 环境技术, no. 03 vo 39 (2021): 2–3.

¹³刘南；乔凡宸；师婉睿；任心怡；牛富荣，“欧盟新能源汽车动力电池回收利用的法律制度与启示——基于欧盟《新电池法》的分析,”环境影响评价, no. 06 vo 44 (2022): 44–49, https://doi.org/10.14068/j.ceia.2022.06.009.

电池回收被认为是减少与电池生产相关环境影响的最佳方法，它可能会降低约50%的材料生产能源需求，全面降低对环境的污染⁹。退役动力电池资源价值丰富，从资源利用的角度，高效回收利用这些金属资源，能够降低和缓解对矿产资源过度开采和进口的依赖，减少对于锂（Li）、镍（Ni）、钴（Co）等矿产资源的过度开采，能够对全球新能源汽车产业的可持续发展起到促进作用，同时也能大幅削减动力电池全生命周期的碳排放总量¹⁰。另一方面，废电池中的重金属和化学物质如果不能妥善处理，会渗入地下导致水污染和生态系统破坏，同时还可能通过食物链传递，危害人类身体健康。

从长远的角度来看，整个动力电池回收市场潜力巨大。电动汽车动力电池的使用寿命通常只有5至8年，电池组的持续使用造成电动汽车续航能力锐减，大量老旧动力电池将很快面临退役，尤其是早期电动汽车使用的低镍（<50%）NCM的电池¹¹。中国汽车技术研究中心数据显示，2020年中国累计产生约20万吨的退役动力电池，到2025年将增至78万吨¹²。

国际关于电池回收相关政策（表1）

国家/机构	时间	法案/政策	要求
美国能源部	2021	《美国国家锂电发展蓝图2021–2030》	提出要实现锂电池报废再利用和关键原材料的规模化回收，规划完整的锂电池回收价值链的建设和布局，推动回收技术发展
德国	2021	新电池法案 (BattG2.0)	赋予管理机构广泛的责任以整治电池制造市场，并对各回收系统的收集与回收率进行检查监督
韩国国会	2021	《大气环境保护法》修订	取消以往登记车辆的电池强制回收，允许出售汽车报废电池，提高废旧动力电池的二次利用率
瑞士联邦环境署	2022	《废物指南》	明确了车用锂电池回收规则，鼓励汽车制造商实施环保处置系统
欧盟	2022	《欧盟电池与废电池法规》修订	设定了与动力电池回收相关的目标，对电池的回收措施和电池金属材料回收率做出了更严格的要求

来源：各政府部门官网，光大证券，公开信息，德勤

美国、欧盟、日韩等发达国家和地区对动力电池退役报废回收均十分重视¹³。在其发布的相关法案和政策中，明确提出电池回收的重要性，旨在推动回收利用体系的建设，引导行业的规范化。比如，美国在《美国国家锂电发展蓝图2021-2030》中提出要实现锂电池报废再利用和关键原材料的规模化回收，规划完整的锂电池回收价值链的建设和布局，以推动回收技术发展；德国、瑞士等要求提升电池回收率且加强监管力度。

中国自2014年以来，多部门相继出台相关政策引导与支持新能源车动力电池回收行业的发展。在制定行业目标规划、完善规范要求、鼓励商业模式创新等方面做出部署。由市场监管总局和工信部发布的关于开展新能源汽车动力电池梯次利用产品认证工作的公告中指出，健全动力电池梯次利用市场体系，促进动力电池梯次利用行业健康有序发展，鼓励有条件的地方加快构建资源循环利用体系，在政府投资工程、重点工程、市政公用工程中使用获证梯次利用产品。



1.4 研究目的及意义

通过核算电池碳足迹，可比较不同型号电池的环境影响，并探索降低电池碳足迹的潜在方法。这一过程为评估电动汽车行业的碳排放速度和强度提供了必要的数据库，对于提升电动汽车碳减排效果至关重要。

然而，目前不同电池碳足迹核算方法的数据和结果存在显著差异，数据来源的不确定与方法的不统一可能得出错误的结论，并对如何减少电池的环境影响造成错误判断。相关研究依赖的数据通常来自于先前发表的文献，且在评估电池循环寿命或效率等关键参数时使用了不同的假设；此外，部分研究未追溯电池材料的上游工艺，也导致了结果的差异；评估方法的差异也会影响核算范围和系统边界，进而导致现有电池碳足迹的核算结果存在较大差异。因此，准确测算电池的全生命周期碳排放量，并挖掘其碳减排潜力变得迫在眉睫，这将需要更加准确和统一的数据来源以及评估方法，以确保得出可靠的结论。

本报告根据统一的核算方法和可靠的数据来源，全面（多技术路线）、系统（LCA核算方法）、客观（考虑跨期因素）地整理、分析动力电池中NCM电池、LFP电池、固态电池“从摇篮到大门”的生命周期碳足迹，主要包括原材料获取和生产制造阶段。同时探究影响电池碳足迹的主要因素，并提出相应的减碳措施。针对回收阶段，将量化评价不同回收方式的减碳效益。



电池特性 与制造工艺

2.1 电池性能比较

传统锂离子电池由正极材料、负极材料、电解液、隔膜和电池外壳五部分组成¹⁴。根据目前市场发展情况，选取出货量 and 装机量最多的LFP、NCM电池作为动力电池的主要研究对象，同时，相较于传统锂离子电池，固态电池以较高的安全性能和能量密度近年来迅速发展，被认为是未来的关键电池技术之一，也是该报告的研究对象之一。三类电池各方面性能比较见表 2所示。

不同锂电池性能比较^{15,16,17}（表3）

	LFP	NCM	固态电池
正极材料	LiFePO ₄	LiNi _x Co _y Mn _{1-x-y} O ₂	高电势材料
负极材料	石墨	石墨	锂金属
单体电压	3.2V	3.7V	5V 以上
安全性	较高	中	高
能量密度	150–170Wh/kg	200–300Wh/kg	350–500 Wh/kg
循环寿命	3500次以上	2500次左右	5000次以上
成本	一般	略高	高

¹⁴Yuhan Liang et al., “Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries for Greenhouse Gas Emissions,” Resources, Conservation and Recycling 117 (2017): 285–93.

¹⁵Xiong Shu et al., “Life-Cycle Assessment of the Environmental Impact of the Batteries Used in Pure Electric Passenger Cars,” Energy Reports 7 (2021): 2302–15.

¹⁶王福振；马什鹏；张鑫新；黄学江；马永娟，“新能源汽车生命周期内减碳关键技术的研究.” 汽车文摘, no. 01 (2023): 34–38, <https://doi.org/10.19822/j.cnki.1671-6329.20210280>.

¹⁷Prasad Mandade et al., “Environmental Life Cycle Assessment of Emerging Solid-State Batteries: A Review,” Chemical Engineering Journal Advances, 2022, 100439.

¹⁸俞立严，“性能提升拉动装车量 LFP电池跑赢NCM电池。”

动力电池根据电解质状态大致可分为液态和固态两大类。液态锂电池经过近十多年的发展已成为全球车用动力电池市场上的主流，而固态电池尚未实现大规模应用。

LFP和NCM都属于液态电池，主要区别在于正极材料。LFP电池的正极材料是磷酸铁锂（LiFe-PO₄），而NCM电池使用的正极材料是镍（Ni）、钴（Co）、锰（Mn）等材料。固态电池的整体结构与LFP和NCM相似，但使用了不可燃的固态电解质替代液态电解质，提高了电池的安全性。另外，固态电池采用金属锂作为负极材料，而不是LFP和NCM电池所用的石墨，这不仅降低了负极材料的使用量，还提高了电池的能量密度。

固态电池的固态电解质相较液态电解质具有更高的循环稳定性，其理论能量密度可达700Wh/kg，根据Fraunhofer（2022）预估，新兴固态电池的电池级能量密度可达350-500Wh/kg。固态电池能够在-50°C至200°C的温度范围内保持放电功率，极大地缓解冬季电池容量衰减的问题。尽管固态电池在安全性和能量密度等方面优于传统锂离子电池，但仍然存在一些挑战，如固态电解质的离子导电性较低、充电速度较慢、固/固界面接触性和稳定性差以及电解质对空气敏感等。

NCM电池制造需要使用金属，因此成本较LFP电池高¹⁸，且对原材料的依赖性更强。尽管LFP电池也存在缺陷，如能量密度低、低温性能差等，但其在安全性、循环寿命及成本方面优势明显。

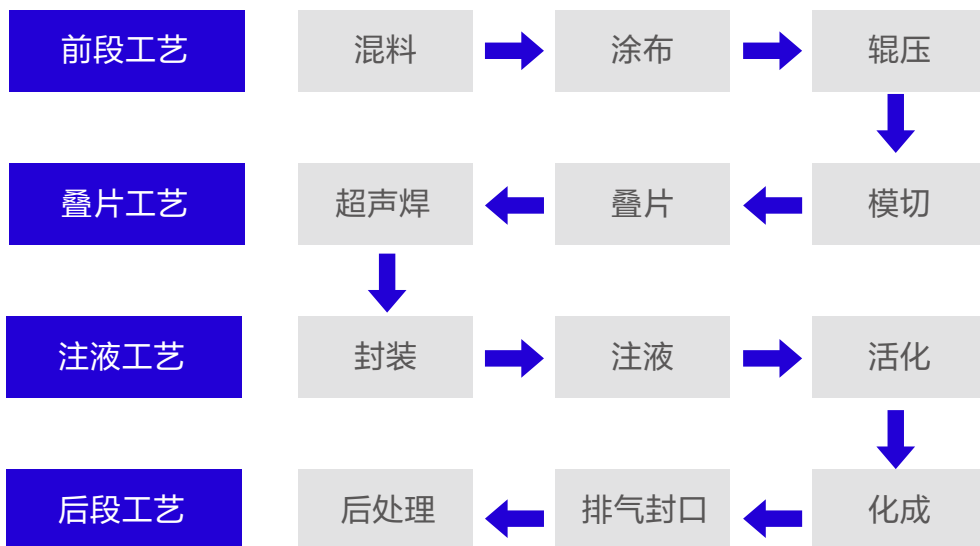
2.2 工艺流程

LFP电池和NCM电池的工艺流程大致相似，大致分为前段工序（极片制备）、中段工序（电芯装配）、后段工序（化成封装）三个部分（如图5）。

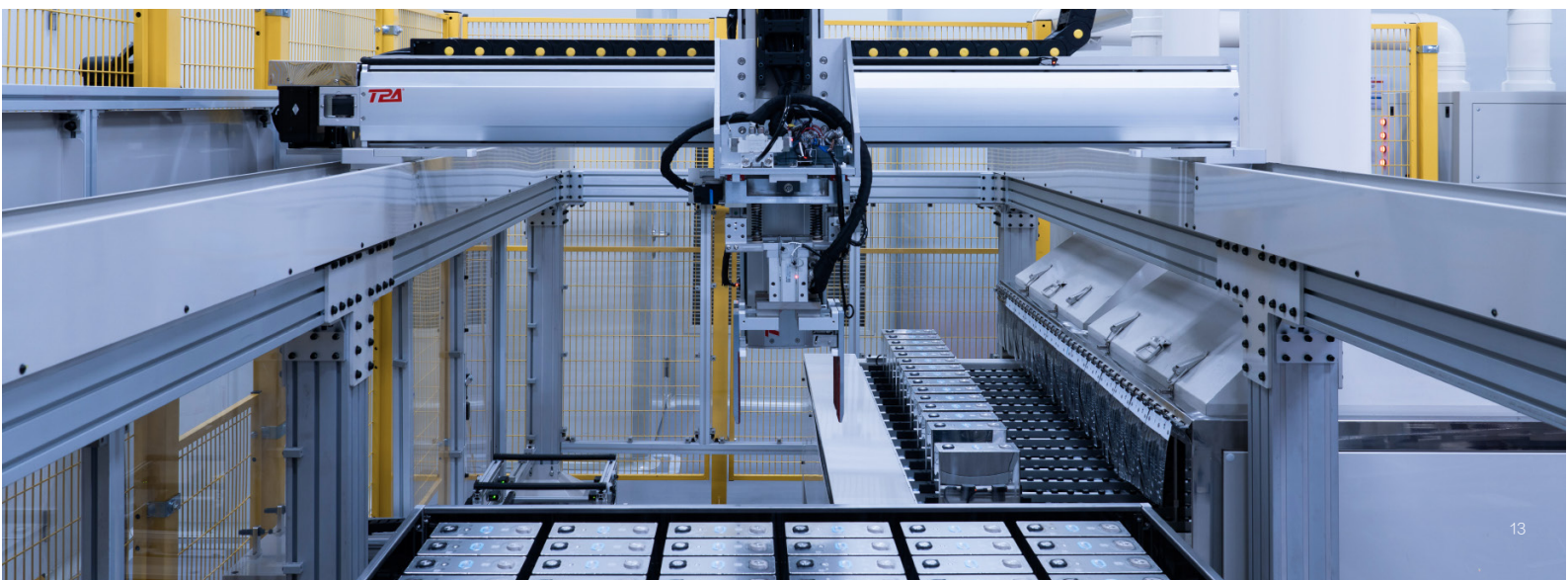
前段工艺，电极材料（活性材料）与导电添加剂、溶剂和粘合剂混合均匀以产生浆料，后将其涂敷在集流体上（一般正极为铝箔，负极为铜箔）。聚偏氟乙烯（PVDF）是常用的粘结剂，而N-甲基吡咯烷酮（NMP）则是常用的溶剂，二者通常搭配使用。

中段工艺包括叠片以及注液。软包电池采用叠片工艺，在模切、叠片、焊切后，再经过封装、注液、化成几个工序；而圆柱电池则将涂布的电极片经过压缩、切缝并用隔膜卷起以形成三层组件，该组件进一步压延、切缝并卷绕成接收袋，并注入电解液，再封口。

软包电池技术工艺（图5）



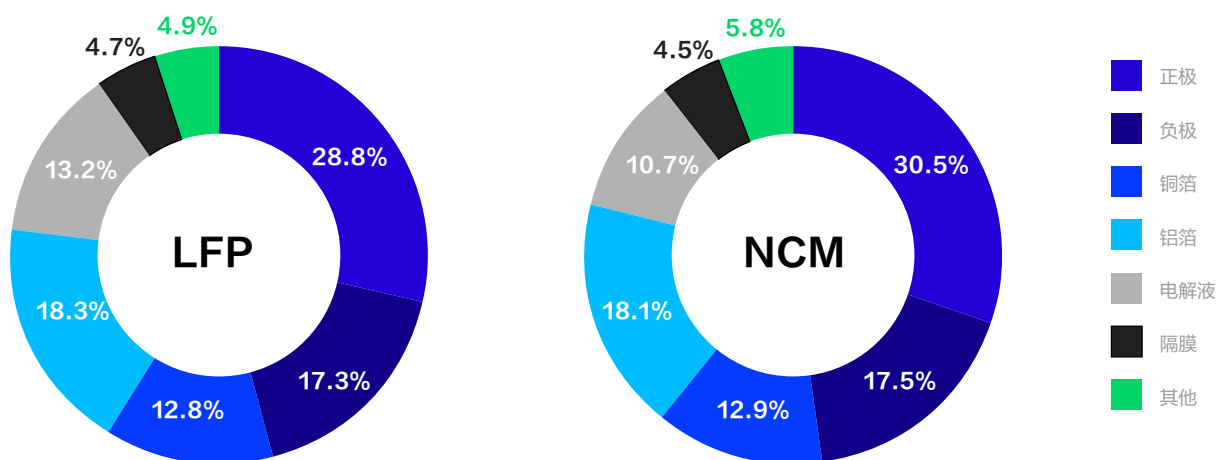
与传统液态锂离子电池相比，固态电池的前段工序基本与液态锂离子电池相同，中、后段工序上，固态电池需要加压或者烧结，不需要注液化成。



2.3 电池各部件 质量占比

如图6所示，在1kWh的两类电池中，正极、负极、铜箔、铝箔和隔膜等的质量比几乎相同，其中正负极质量占比近50%。铝在正极材料的制备、电芯的铝塑膜、电池包和模块外壳均被广泛使用；而聚丙烯（PP）和聚乙烯（PET）等塑料则通常用于电池包装，用以保护电芯内部材料，而电池包装对塑料壳体材料的需求也较大。

两种1 kWh电池系统中不同成分的质量比¹⁹（图6）

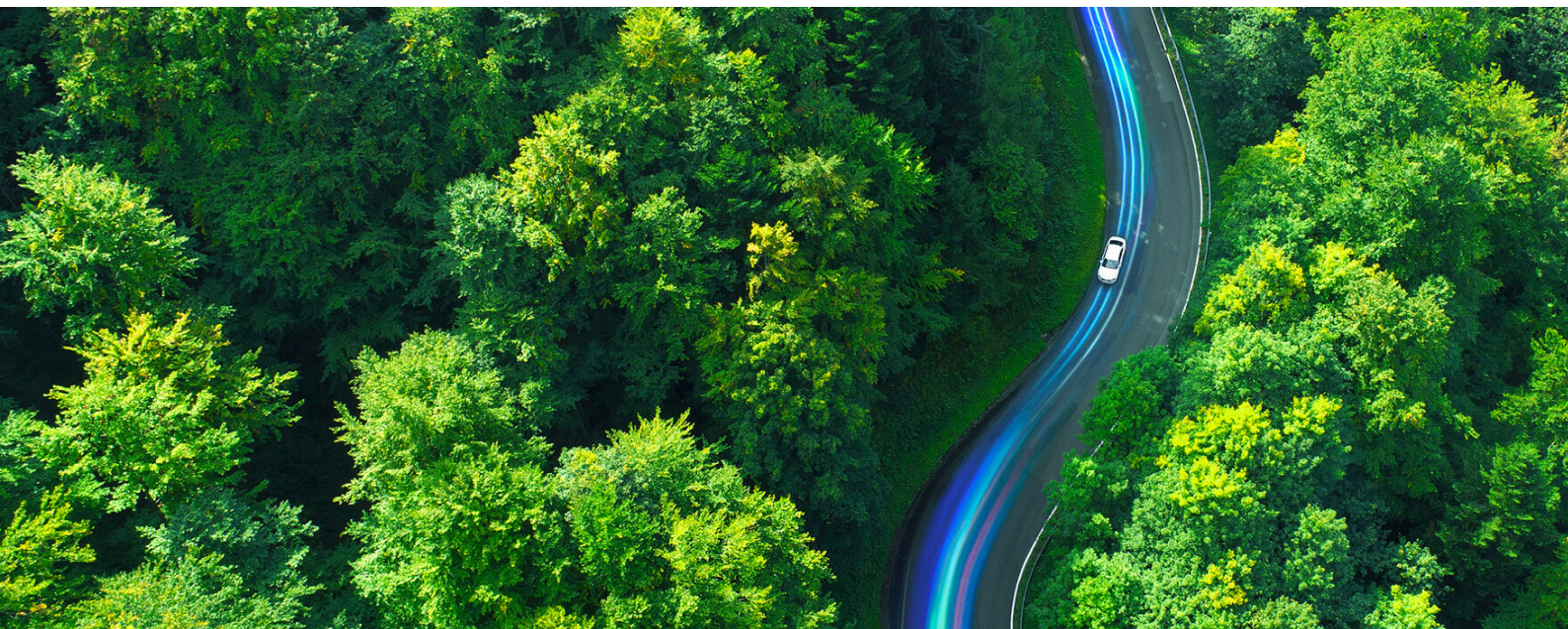


¹⁹ Shu et al., "Life-Cycle Assessment of the Environmental Impact of the Batteries Used in Pure Electric Passenger Cars."



电池全生命周期 评价方法

全生命周期评价方法被广泛用于评估各种电池技术的碳排放情况和潜在环境影响。通过对电池原材料的提取和加工、电池生产制造、电池分销、电池使用、电池回收和处置全过程进行统一环境评价评估，可对比不同类型电池技术的碳排放情况。



3.1 全生命周期 评价方法介绍

全生命周期评价方法（LCA）是一种客观评价产品、生产工艺和活动对环境负荷的过程。它通过辨识和量化物质和能量利用以及由此产生的环境废物排放，评估它们对环境的影响，并寻找改善的途径。依据ISO 14040/44标准，LCA评价包括四个阶段：

- （1）目标和范围，确定研究的框架和目标；
- （2）生命周期清单，对产品价值链上的质量和能量流进行投入/产出分析；
- （3）生命周期影响评估，评估环境相关性，如全球变暖潜力；
- （4）结果解释，基于评估结果提出对策。

LCA也广泛用于评估各种电池技术的碳排放情况和潜在环境影响。通过重点分析电池从原材料获取、生产制造、使用到资源回收利用过程对环境的潜在影响，可提出减碳建议和改进措施。

目前，关于动力电池的全生命周期碳排放核算和管理的标准法规主要包括通用的方法和电池产品专用标准法规。通用类动力电池碳足迹核算标准包括ISO14067、GHG protocol产品核算标准、英国标准协会（BSI）的PAS2050等，这些标准可用于对汽车动力电池产品全生命周期的碳排放进行核算。

电动汽车动力电池全生命周期专用的产品碳足迹相关标准见表3。包括欧盟委员会发布的《用于移动应用的高压可充电电池的产品环境足迹种类规则》（PEFCR）、欧盟委员会根据新电池法发布的《电动汽车电池碳足迹计算规则》（CFB-EV），以及中国化学与物理电源行业协会牵头制定的《动力和储能电池产品类别规则（PCR）》。

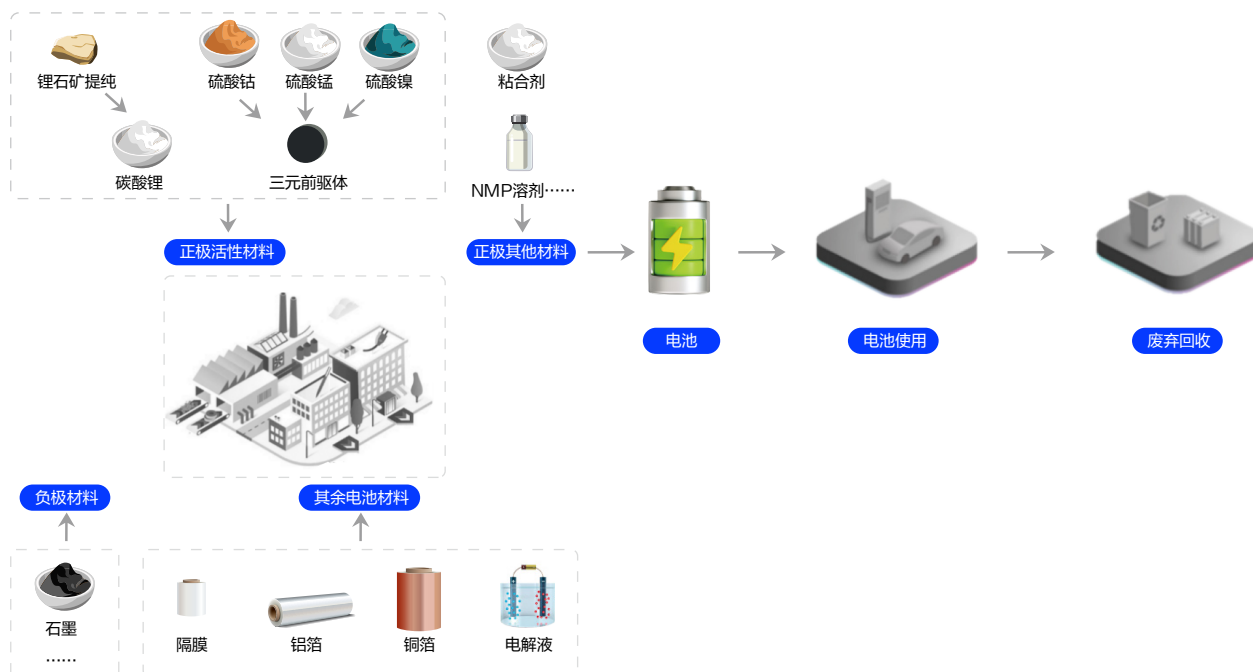
不同动力电池专用标准对比（表3）

标准名称	用于移动应用的高比能量可充电电池产品的环境足迹种类规则（PEFCR）	电动汽车电池碳足迹计算规则（CFB-EV）	动力和储能电池产品类别规则（PCR）
发布机构	欧盟委员会	欧盟委员会	中国化学与物理电源行业协会
适用产品	• 电动车用电池（如电动自行车、电动汽车、电动公共汽车等） • 消费电子类用电池（如平板电脑和手机、电脑等） • 电动工具类用电池（如电钻等）	• 在欧盟成员国上市或投入使用的 所有电动汽车（EV）电池	• 动力电池：为工具提供动力来源的动力电池，多指为电动汽车、电动列车、电动自行车、电动工具等提供动力的蓄电池，充电器也包含在内； • 储能电池：用于太阳能发电设备和风力发电设备以及可再生能源储蓄能源用的蓄电池
覆盖的技术及化学体系	• 锂离子电池：LCO（钴酸锂），NCM（镍钴锰酸锂），LiMn（二氧化锰），LFP（磷酸铁锂） • 镍氢电池	NA	NA
包含的产品组件	• 电芯 • OEM组件：电池管理系统（BMS）、电池控制系统（BCU）、电池的热管理系统（ThMU）和充电器	• 电芯 • 模组 • 电池 • 电池管理系统（BMS）、制冷系统、热管理系统等	• 电芯 • 模组 • 电池 • OEM组件：电池管理系统（BMS）、电池控制系统（BCU）、电池的热管理系统（ThMU）和充电器
功能单元	在使用寿命期间提供的总能量平均到1 kWh		
系统	摇篮到坟墓		
边界	• 原材料获取阶段 • 生产阶段：按工序生产 • 分销阶段：最终产品分配和运输到消费者、最终使用客户或区域储存 • 使用阶段：考虑充放电损耗 • 尾端回收阶段：电池收集、拆解和再生	• 原材料获取和预加工阶段：从自然界提取资源并对其进行预处理，直至其用于进入电池生产设施的产品部件，前体生产应包含在内 • 生产阶段：电池活性材料的生产，电解液盐的生产，正负极等部件的生产，电芯组装，模组组装，电池包组装 • 分销阶段：电池从生产地运输到车辆组装地 • 尾端处理阶段：收集、拆解、回收和处理	• 原材料获取和预加工：包括采矿和其他相关采购、预处理以及原材料及活性材料的运输，直至电芯和电池元件（活性材料、隔膜、电解液、外壳、主动和被动电池元件）以及电气/电子元件的制造 • 生产阶段：包括电芯的组装、电池与电芯和电气/电子部件的组装 • 分销阶段：最终产品分配和运输到消费者、最终使用客户或区域储存 • 尾端处理阶段：电池收集、拆解和再生

3.2 电池生命周期 阶段介绍

电池生命周期整个过程按照系统边界可分为两类：“从摇篮到大门”，即从原材料获取和加工到电池生产制造的过程；“从摇篮到坟墓”，即从电池原材料获取和加工、电池生产制造、电池分销、电池使用阶段、电池回收和处置全过程（见图 7）。本报告电池碳足迹核算采用前者。

NCM电池全生命周期示意图（图 7）



具体环节包括

原材料获取及加工

该阶段涵盖原材料从自然界中提取、预处理的过程，包括正极，负极，电解液，隔膜，铜箔，铝箔，壳体七大部件的材料获取。以正极为例，其原材料进一步追溯为正极活性材料，添加剂，导电剂，溶剂等。**NCM**动力电池和**LFP**动力电池最主要的区别在于正极活性材料。

该阶段的排放来源于开采、选矿、冶炼、提取等过程使用的材料与能源消耗，这些过程中涉及的运输也包括在内。

电池生产和制造

该阶段从原材料产品部件进入生产现场开始，到成品离开生产设施结束。其中包括正负极等部件的生产，电芯组装，模组组装，电池包组装。

电池部件的生产涵盖了原材料准备、浆料制备、涂布、辊压和分切等环节。电芯组装是将电极、隔膜和电解液等精确组合，构建电池核心的高精度制造过程。模组组装则将多个电芯单体精密组装形成电池模块，而电池包组装则将电池模块、电池管理系统和保护外壳融合，形成最终的电池组件。

电池生产需要在超净干燥室（**Clean & Dry room**）中进行，该阶段的能源消耗根据工厂生产线的实际情况测算，整个电池部件制造与组装需要消耗大量能源，与电池部件的制造过程相比，电池组装过程的能源或材料消耗可以忽略不计。

使用阶段

电池使用阶段，需要考虑与电池充放电效率、衰减速度、使用寿命（循环次数）和电池容量等技术性因素引起的能量损失。

欧盟《电动汽车电池碳足迹计算规则（**CFB-EV**）》中规定，电池使用阶段应排除在生命周期碳足迹核算范围之外，除非制造商做的一些设计会对使用阶段产生巨大影响，否则使用阶段的排放就不考虑在内。

尾端处理

电池尾端处理过程包括填埋、焚烧和回收再利用三种技术。首先对退役电池进行处置，包括拆卸电池部件，如外壳、冷却系统、塑料等部件与电池分离，拆解后的材料可进行填埋或焚烧；部分材料可进行回收再利用，用于电池的再制造。

回收是通过梯次利用、火法冶金、湿法冶金等处理方式，对废弃电池进行处理，以实现再次利用或转化为再生材料。火法冶金和湿法冶金等回收过程的主要产物是金属部分，其中包括来自电池和矿渣的金属，这些金属部分可以通过湿法冶金工艺提炼，以分离有价值的金属或合金，如**NCM**中的镍、钴、锰，随后，通过湿法冶金处理这些金属合金，可回收金属硫酸盐，可用于再次制造电池活性材料。

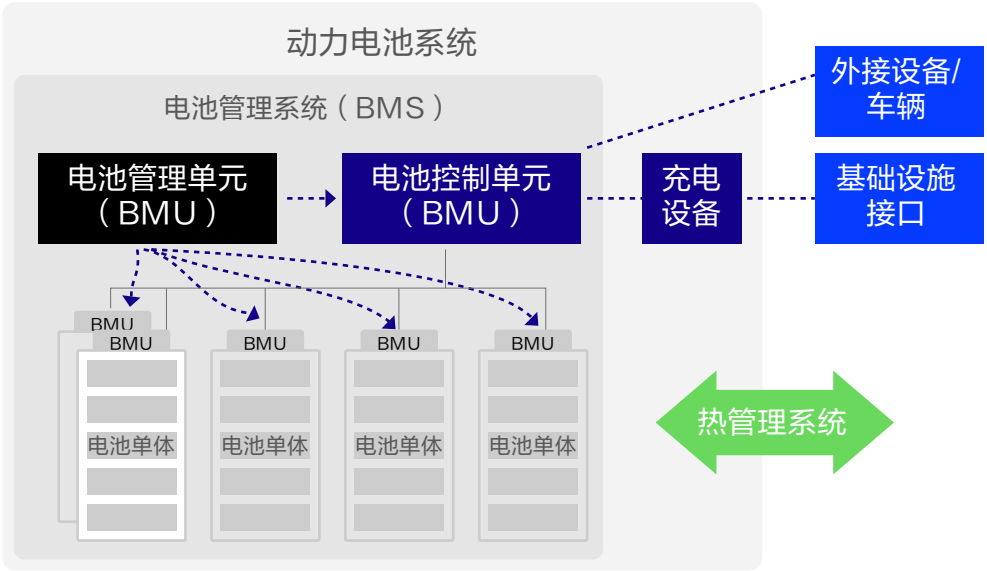
由于固态电池仍在开发中，其寿命尚未确定。并且在使用阶段，不同电池的循环寿命、充放电次数、电池损耗、车辆行驶里程等一些关键参数会采取不同的假设，难以统一。因此，本报告仅考虑从原材料到生产制造的电池碳足迹，即遵循“从摇篮到大门”的范围边界，从电池原材料的开采（如矿石等）开始，到电池组装出厂前的生产结束为止，同时将单独对比采用不同回收利用技术进行废弃电池处理的碳排放情况。

3.3 全生命周期评估界限与范围

电池在制造电池系统的过程中，首先使用原材料制造和生产电芯（单体电池，cell），多个电芯通过连接器和电路板进行连接形成模组（module），数个模组以及其他附件如电子器件、电池管理系统（BMS）等组装在一起，形成电池包（pack）。

电池包的结构如图8所示，由电池单体、BMS、电池热管理系统（ThMU）等部件组成。BMS包括电池控制单元（BCU）和电池管理单元（BMU）在内的所有电气/电子部分，BMU是用于电池管理的电子部分，BCU是电子元件，如开关和接触器。ThMU是与电池直接相关的热管理部件，包括各种静态或动态热交换的部件（如导热部件、循环液体管等）。

动力电池系统结构示意图（图8）



来源于PEFCR

不同类型的电池具有不同的原材料、生产工艺、电池性能、回收工艺，因此需对具体电池类型进行数据收集及清单制定来开展LCA研究。考虑到NCM电池和LFP电池在电动汽车中的广泛应用，本报告将其作为研究对象。同时，尽管固态电池仍处于新型发展阶段，但其结构大体与目前的锂电池相似，且因较高的能量密度未来可能取代液态电池成为主流，因此，也将其纳入研究比较范畴。

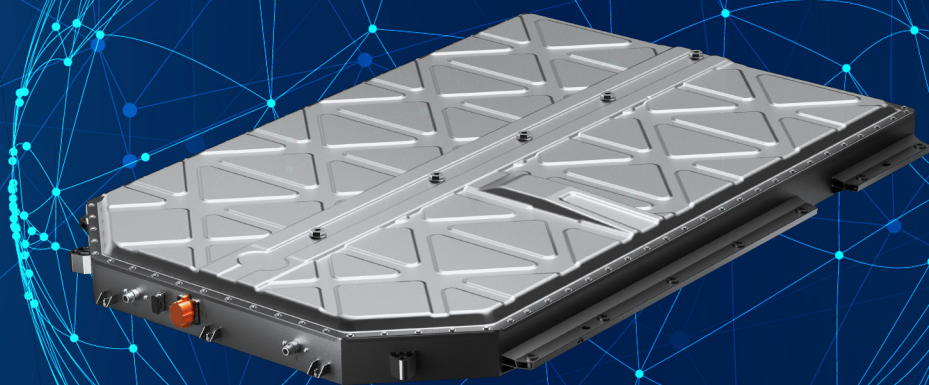
功能单元（FU）确保了不同类型电池LCA结果的可比性，本研究中将功能单位规定为1kWh的电池系统，相当于电池每千瓦时容量的生产将产生的二氧化碳排放量（ $\text{kgCO}_{2-\text{eq}}/\text{kWh}$ ）。

3.4 数据来源



NCM、LFP电池虽然已广泛应用于电动汽车，但目前很少有公司披露其生产、回收过程的能源消耗。固态电池被视为下一代电池技术重点推进的选项，商业化仍有距离，其公开数据少，大部分数据来源于实验室阶段。除此之外，虽然对于电池碳足迹的核算都依据ISO规范，但鉴于移动电池技术的进步和变化，或对原始清单数据选取不同，均可能对电池碳足迹结果造成影响，对相同产品的环境评估也可能得出不同的结果。

因此，本研究根据相关文献、行研报告、国内外数据库等电池全生命周期各阶段数据来源，依照数据梳理不同型号电池，形成跨期的碳足迹变化趋势，挖掘排放热点，以及分析降低电池碳足迹的可行方式。



电池生命周期 碳排放分析

4.1 电池包碳足迹分析

4.1.1 不同技术类型电池包跨期碳足迹比较

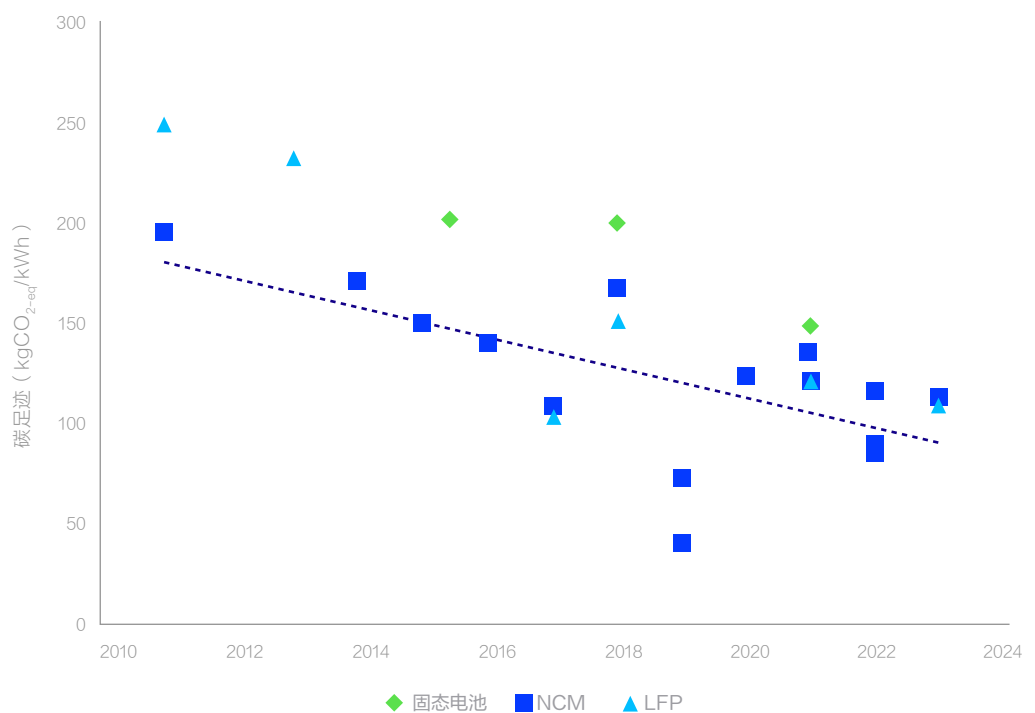
本章分析了NCM电池、LFP电池及固态电池的碳足迹趋势，旨在识别电池的生命周期碳排放热点，同时挖掘能够减少电池环境影响的关键环节和主要因素，以为电池低碳发展提供可行路径。

由于动力电池行业的发展迅速，许多生产工艺和技术仍处于更新迭代的阶段，大部分企业不愿公开其生产过程的工艺细节和能耗等原始数据。

因此，本报告通过文献收集、整理并分析了从2010年至2022年有关不同型号电池的LCA研究数据，核算从“摇篮到大门”的车用动力电池包碳排放，披露包括电池重量（kg），容量（kWh），能量密度（Wh/kg）等基本信息，提供电池包生产的详细结果。除此之外，这些文献均使用1kWh电池容量的功能单元衡量不同类型电池包的碳足迹。

按照文献发表的时间排序，图9展示了不同类型电池包从“摇篮到大门”的碳足迹。电池包碳足迹总体呈现明显的下降趋势。其中，不同型号NCM电池包的碳足迹从2011年近200kgCO_{2-eq}/kWh，下降到2022年的98kgCO_{2-eq}/kWh左右；LFP电池包近年来碳足迹在100kgCO_{2-eq}/kWh左右；固态电池目前仍处于研发阶段，工艺路线尚不成熟，披露的数据较少，但其基于实验室数据的碳排放远高于已成熟的LFP以及NCM电池技术。

2010–2022年电池包碳足迹趋势图（图9）



根据相关文献、公开数据整理，NCM电池无具体型号

由于电池商业化初期，生产阶段使用的设备相对落后，需消耗较大能源，造成早期电池的碳足迹较高。但随着电池制造技术的提升及产线的升级，在电池生产过程中能源利用效率提高，电池碳足迹降低。另一方面，电池碳足迹的差异还可能来自电池结构的不同，由于电池的型号以及容量均不尽相同，电池实体制造和电池模型的差异是不可避免的，逐渐完善的电池标准化才能减少这种不确定性。当然，在电池生产组装过程中由于生产工艺和数据采集渠道不同也可能会导致研究结果的差异。

事实上，电池技术朝着探索更高性能、更高能量密度的方向发展。越来越多的企业开始注重实现电池环境友好的生产方式，关注电池生命周期的碳排。比如电池科技企业远景动力^P SBTi(AESC)，通过引入先进的制造技术和材料创新，打造可持续且低碳的电池产品。

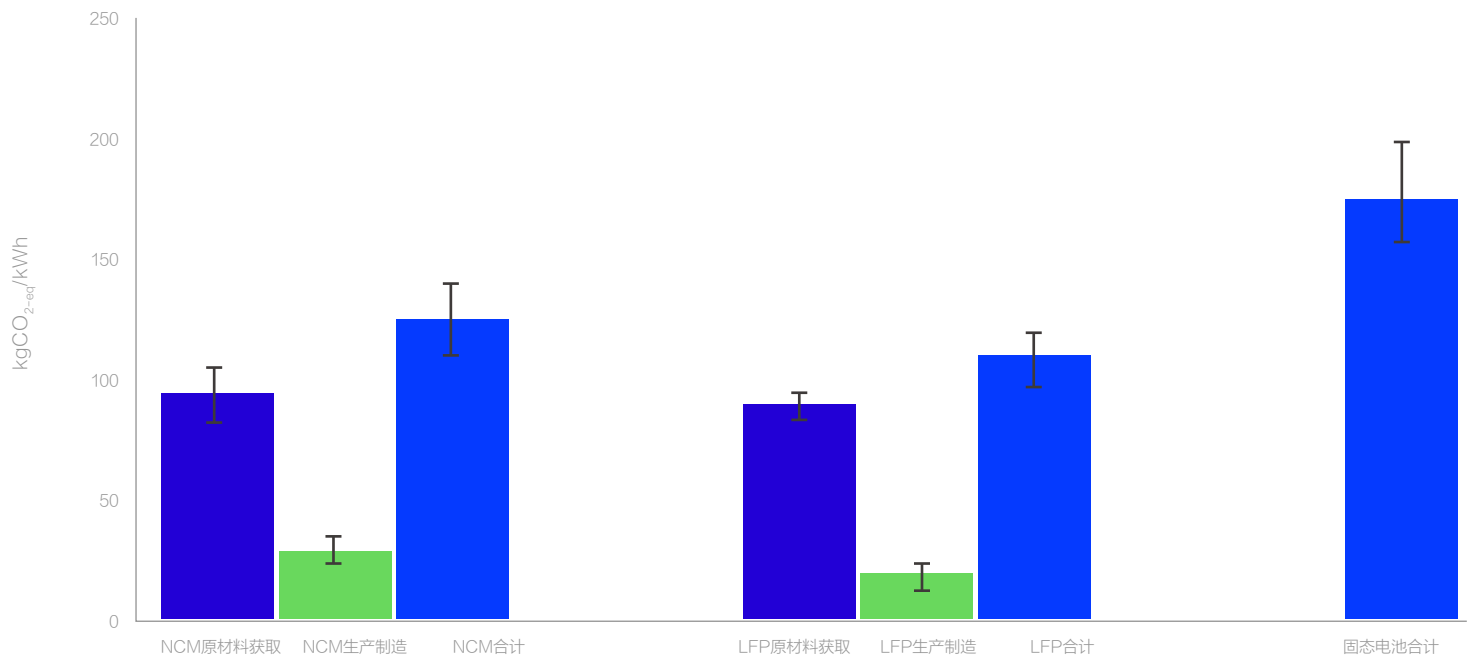
随着碳排放问题的日益凸显和环境保护意识的增强，电池生命周期的碳足迹会越来越受到关注。一些国家和地区已经开始出台相关政策和标准，要求电池制造商和使用者对电池的生命周期碳排放进行评估和披露，以促进电池的环境友好和可持续性。



4.1.2 不同技术类型电池包 跨生命周期阶段碳足迹比较

基于图9整理的电池包数据，从中选取LCA方法学边界明晰的、各阶段碳排放详细的，不同类型电池包，进行“从摇篮到大门”的碳足迹比对（见图10）。研究结果显示，主流的动力电池（NCM和LFP），从“摇篮到大门”的生命周期碳足迹在 $100\text{--}120\text{kgCO}_{2\text{-eq}}/\text{kWh}$ 左右。固态电池是适用于电动汽车的硫基固态锂电池组，由于固态电池仍在开发中，仅能获得实验室数据，碳足迹较高在 $150\text{--}200\text{kgCO}_{2\text{-eq}}/\text{kWh}$ 左右。

三款电池各阶段碳排放对比示意图（图10）



NCM和LFP电池，原材料获取阶段的碳排放在80%左右。NCM的正极材料含有镍、钴、锰等金属，均需要经过开采、冶炼等过程，会消耗大量化石能源，导致其该过程的碳排放比LFP电池略大。

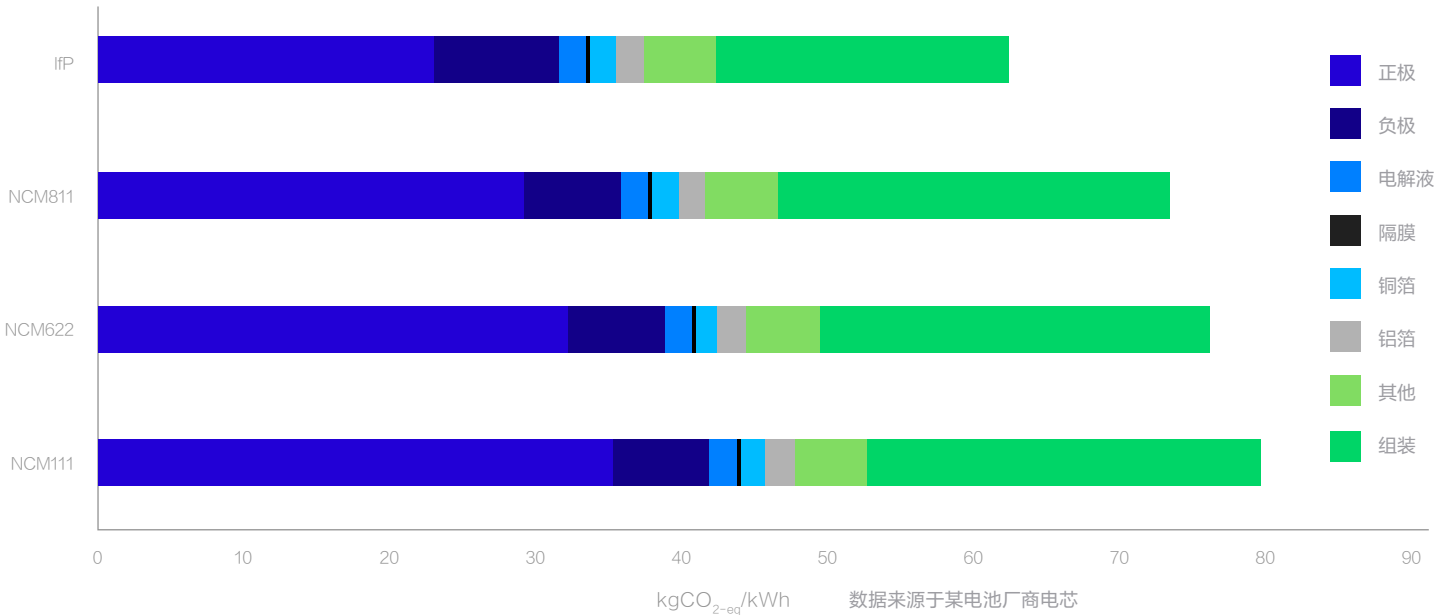
在电池生产制造环节中，需消耗大量的电力和天然气。其中，超净干燥室是动力电池制造碳排放的主要来源，因为电池的整个生产过程中有多个工艺步骤需要在真空干燥环境中进行，需要持续的能源供应来保持稳定的温度。不同的操作处理的规模、技术水平和电池系统中的性能均对电池碳足迹产生影响。固态电池在该阶段的碳排远高于传统的锂离子动力电池，可能由于其目前仍处于发展阶段，尚未规模化量产，造成碳排放较高。而NCM电池比磷酸铁锂电池在生产阶段产生更多的碳排放。



4.2 电池电芯碳排放热点分析

4.2.1 正极

LFP电芯和不同类型的NCM电芯碳排放情况（图11）



电池由基本单元电芯，通过连接器、电路板、BMS等连接形成模组和最终的电池包。根据相关数据，电芯的碳排放占电池的65%左右，是整个电池包碳排放的主要来源。

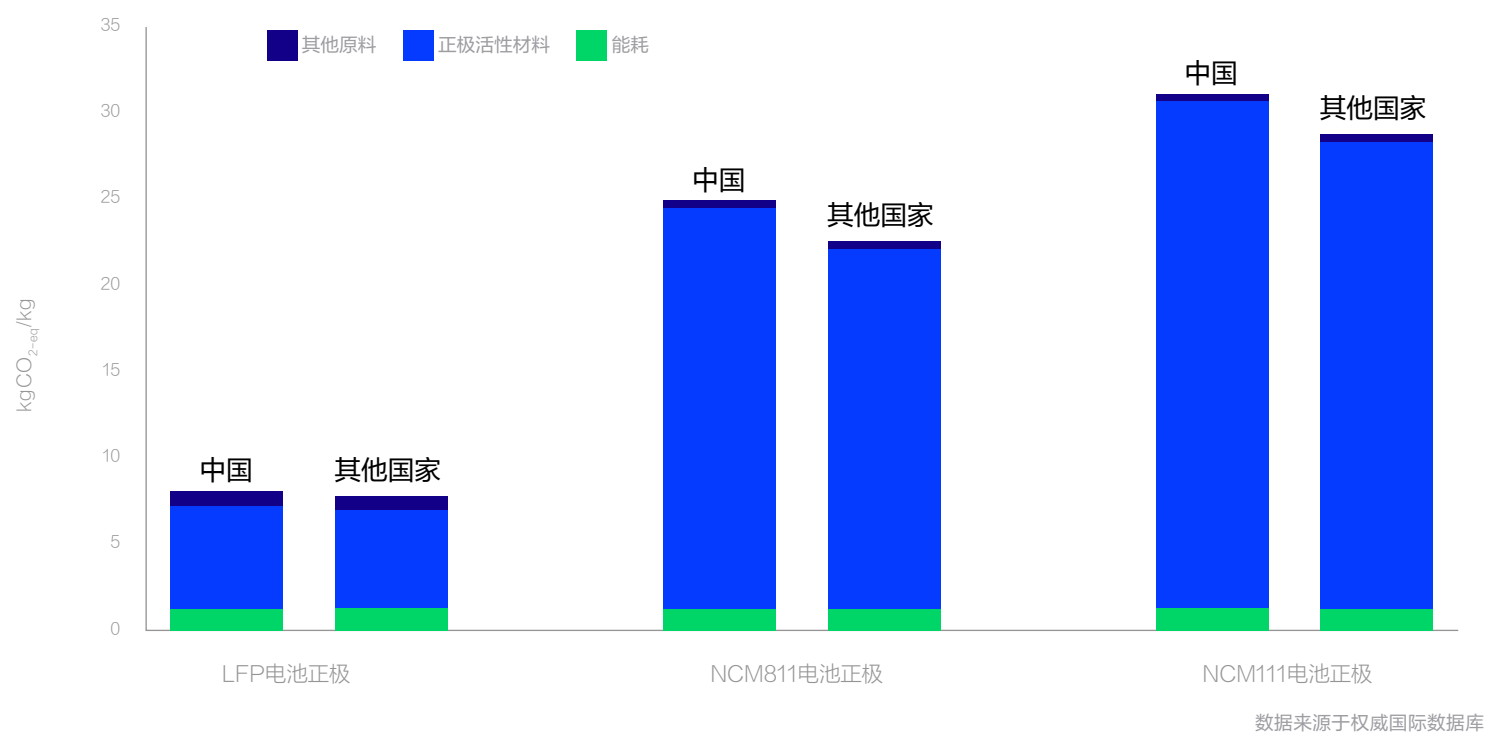
电芯“从摇篮到大门”的生命周期同样包括原材料开采和生产制造。原材料开采中的正负极材料碳排放是其重要碳排放热点，尤其对于NCM正极中的镍、钴等重要原材料的采矿和提取，往往伴随着大量的CO₂排放。

正极材料制备产生的碳排放占比最高。根据某电池厂商数据，NCM电芯正极的碳排放占电池生命周期碳排放量的40%以上，LFP正极碳排放达到37%。（如图11）

LFP电池正极材料碳排低于NCM电池正极材料碳排。根据权威国际数据库，LFP电池正极材料的碳排放在8kgCO_{2-eq}/kg左右，远低于NCM电池（22.4-31kgCO_{2-eq}/kg）（图12）。除此之外在不同国家和地区生产的正极材料，其碳足迹会有差别。

NCM正极材料中高镍、低钴技术方向材料碳排放有下降趋势。目前市场上的NCM电池的正极材料逐步向高镍、低钴过渡（由NCM111逐渐发展为NCM811）。NCM的碳足迹呈下降趋势，与NCM111相比，NCM622和NCM811的碳足迹分别减少了4%和8%左右（图12）。

不同区域LFP与NCM电池正极
碳排放对比（图12）



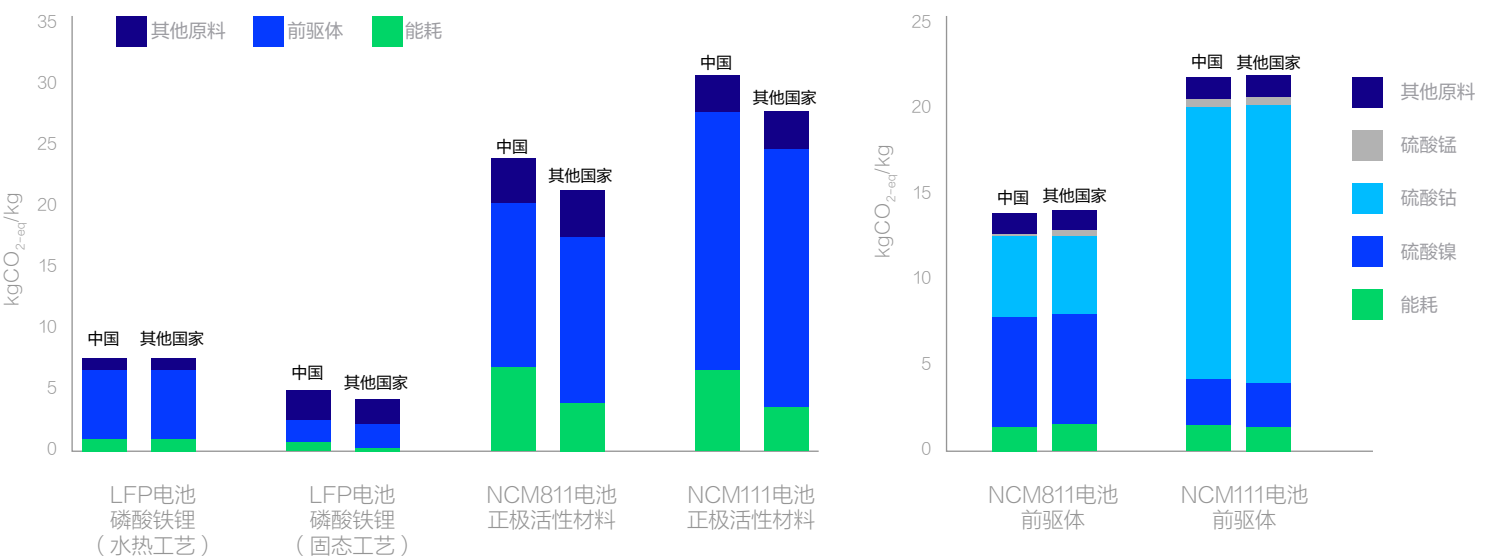
在NCM前驱体中钴的碳排因子高，镍次之，使用高镍材料能一定程度降低NCM正极碳排放。正极材料碳排放主要来源是正极活性材料，而正极活性材料的碳排放来源于前驱体（图13）。对于NCM电池，其正极是由不同配比的硫酸镍（NiSO₄），硫酸钴（CoSO₄），硫酸锰（MnSO₄）混合制成，不同的配比会影响电池的正极材料碳排放，进而影响电池的碳足迹。

NCM正极中镍含量的增加通常也会增加动力电池的比能量，但镍占比越多，材料的热稳定性越差²⁰；钴元素有利于提升材料的电导率与倍率性能，但也造成了材料成本的上升，且不利于环保；锰元素的存在起了稳定结构的作用，但过高的锰含量会降低材料的比容量。由于钴是目前锂离子电池正极活性材料中使用的最昂贵的金属，因此锂离子电池技术也在努力降低钴含量，同时增加镍含量来降低锂离子电池的成本。

NCM811的正极材料碳排放略低于NCM111。由于NCM811中钴的含量低，尽管镍的含量增加，但镍增加的量带来的碳排不如钴减少量的碳排。同时随着镍含量的提升，电池能量密度增加，折算到单位kWh的电池碳足迹将下降。

²⁰ Siyang Liu et al., "Comparative Studies of Zirconium Doping and Coating on LiNi0.6Co0.2Mn0.2O2 Cathode Material at Elevated Temperatures," Journal of Power Sources 396 (2018): 288–96.

不同区域LFP与NCM电池正极活性材料（左）、前驱体（右）碳排放对比（图13）

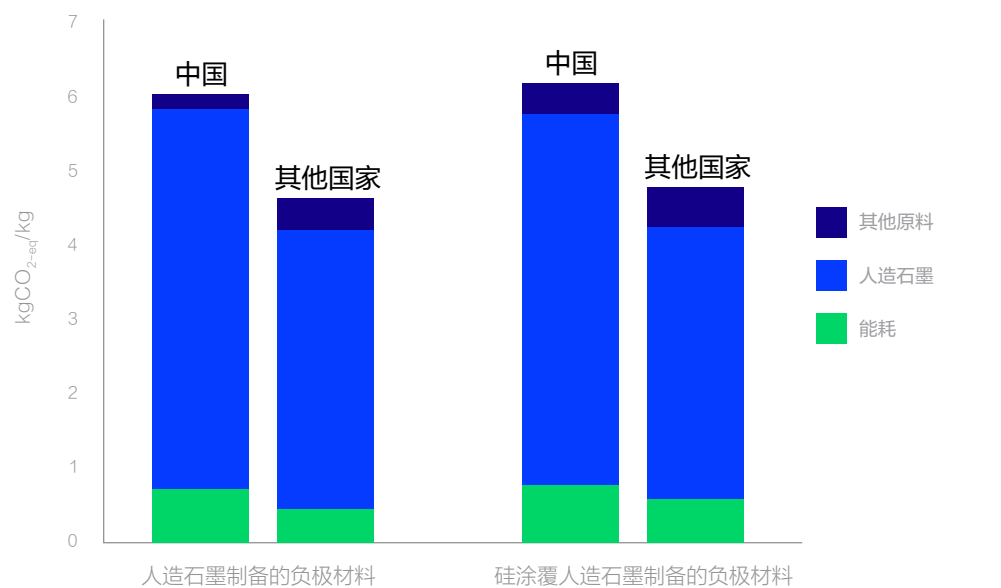


数据来源于权威国际数据库

4.2.2 负极

电池的负极主要由石墨制成，是电池原材料获取阶段第二大排放来源。中国生产的人造石墨碳排放在6.05kgCO_{2-eq}/kg，硅涂覆石墨碳排放则为6.21kgCO_{2-eq}/kg，略高于普通人造石墨（图14）。硅涂覆石墨能够使电池充电过程中，负极上不易出现析锂现象，与石墨材料相比较具有更好的安全性能，但会造成较高的碳排放。

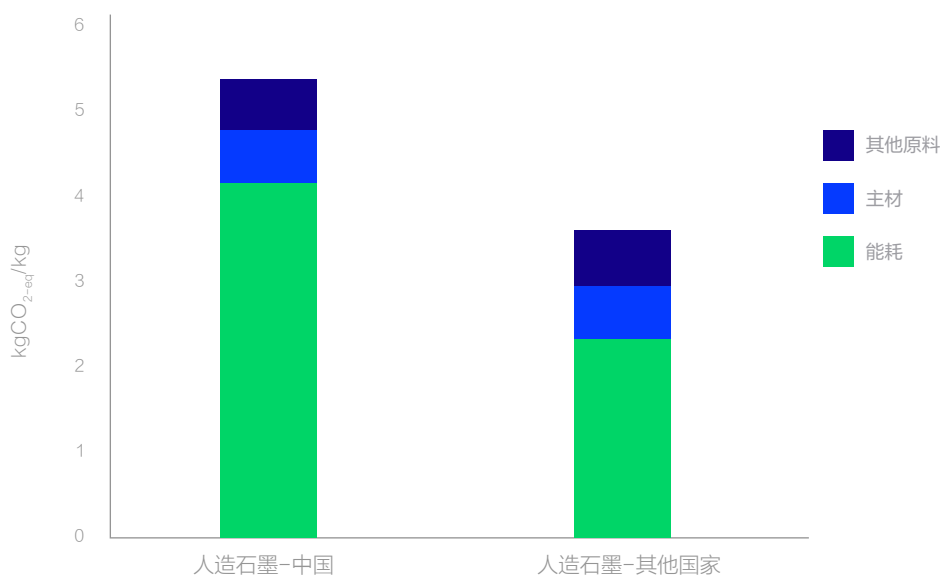
分地区电池负极材料碳排对比（图14）



数据来源于权威国际数据库

中国石墨生产能耗的碳排放占76%，其他地区达到64%（图15）。人造石墨负极的制备工艺复杂，主要分为预处理、造粒、石墨化和筛分等步骤。其中，石墨化是一个高温热处理过程，它提供能量以促使原子重排及结构转变，然而，该过程需消耗大量能量，会产生大量碳排。

负极活性材料碳排分区域对比（图 15）



数据来源于权威国际数据库

以上造成国家间正极、负极材料的碳排放差异，主要原因是，不同国家和地区的能源结构和生产工艺可能存在差异，导致碳足迹的不同。数据库中其他国家电力因子比中国的电网因子低0.3-0.7 kgCO_{2-eq}/kWh。除此之外，一些国家和地区可能在生产工艺和能源效率方面更加先进，从而减少了生产过程中的碳排放。

因此，电池正负极材料具有巨大的减排潜力。通过回收其中的金属元素和石墨等材料，实现资源的有效利用，既可以缓解矿产资源压力，促进可持续发展和减少碳排放，还将带来巨大的经济效益，同时也能抵消正负极材料获取带来的碳排放。

An aerial photograph of a two-lane asphalt road stretching vertically through a dense, green forest. The road has yellow dashed lines in the center and white solid lines on the edges. The surrounding forest is lush and green, with some brownish paths or clearings visible. The lighting suggests it might be late afternoon or early morning, with long shadows cast across the road and forest.

电池碳减排 潜力探索

电池生产的碳排放受其生命周期诸多环节和变量的影响，包括工艺改进、材料及包装改进、电力碳强度的降低等。动力电池碳减排是实现可持续发展的必然选择，通过对动力电池碳减排的潜力展开探索和分析，比较不同碳减排途径的优缺点，能够为动力电池制造企业实现低碳经济和环境友好型转型提供借鉴和参考。

5.1 能源结构

电池整个生命周期主要的能源消耗来自于电力，电力的碳排放也将显著影响电池生产的整个生命周期碳排放结果。

电力的碳排放取决于当地的电力能源结构。由于不同的国家由于具有特定的电力组合，即使是同款电池在不同地区制造，碳足迹也会有差别。根据数据显示（见表4），2021年动力电池的碳足迹在欧洲都较低，其次是美国，主要是因为欧美国家的电力结构相对清洁。同时，LFP电池的碳足迹低于NCM电池，尽管LFP的能量密度通常较小，但NCM正极材料及其前端金属盐产生的过程通常具有更高的碳排放。

不同型号动力电池分地区的碳足迹（kgCO₂/kWh）²¹（表4）

	欧洲	美国	中国	南韩	日本
NCM111	56	60	77	69	73
NCM622	54	57	69	64	68
NCM811	53	55	68	63	67
LFP	34–39	37–42	51–56	46–50	50–55

因时间和能源政策的变化，各国电网的平均碳排因子在不断变化。欧洲电网平均碳排放因子的一般估计值在0.2-0.5kgCO_{2-eq}/kWh，低于美国（0.4-0.8kgCO_{2-eq}/kWh），韩国，日本，中国（0.5-1.2 kg_{2-eq}/kWh）。

相关研究整理了不同国家动力电池碳足迹，与欧洲或中国作者发表的相比，美国通讯作者发表的锂离子电池生产的温室气体排放较低且分散性较低²²。因此使用一致的电网因子对动力电池碳足迹核算以及比较非常重要。

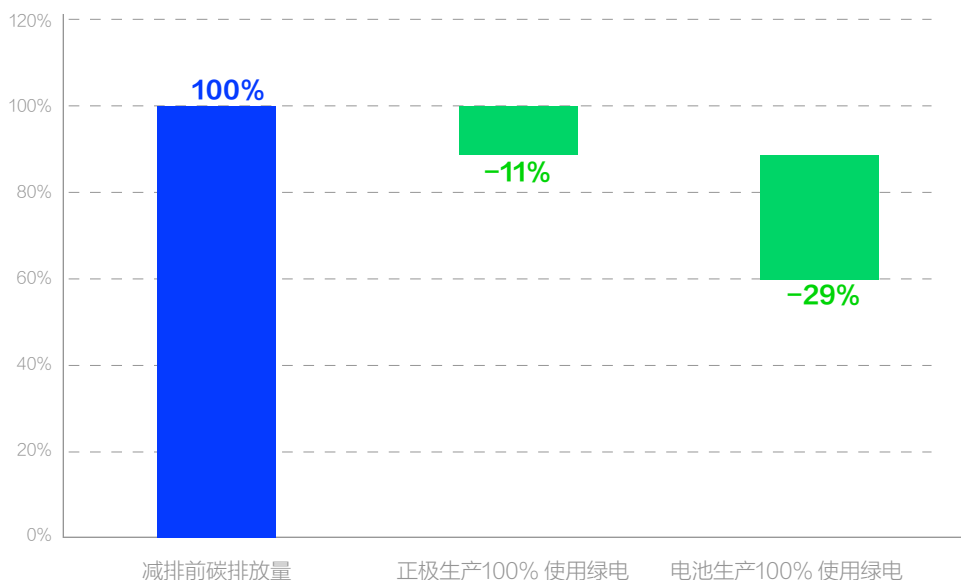
使用绿电能够显著降低电池碳足迹。相较于传统电力排放因子，由于绿电完全由可再生能源生产，其排放因子几乎为0。针对某中国工厂生产的NCM811电池，若其生产过程中用电全部由电网直供变为绿电，则可在其生命周期减少30%的碳排放（如图16）。

同时，部分标准将电池使用阶段电力损耗纳入碳足迹核算，绿色电力的推广可以显著降低电力损耗造成的碳排放，从而降低在这些标准下核算的动力电池碳足迹。

²¹ Stephen Gifford, "The UK: A Low Carbon Location to Manufacture, Drive and Recycle Electric Vehicles" (Faraday Institution, n.d.), https://www.faraday.ac.uk/wp-content/uploads/2021/11/Faraday_Insights_12_FINAL.pdf.

²² Anne Bouter and Xavier Guichet, "The Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries: A Statistical Review of Life Cycle Assessment Studies.," Journal of Cleaner Production, 2022, 130994.

以NCM811电芯为例的电力清洁化减排潜力（图16）



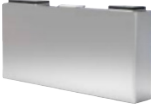
数据来源于某电池厂商电芯生产

由于国家间绿色电力互认体系尚未形成，当国际交易涉及产品碳足迹时，不同国家和机构对于企业生产使用绿色电力的认定标准不一致，国家间电网的绿色电力无法互认。在计算动力电池碳足迹时，国际上已一致认可的绿色电力供应方式为，绿色电力从发电侧直供电侧（不经过电网）。根据欧盟委员会针对欧盟电池法案发布的动力电池碳足迹计算规则，对于欧盟外生产的产品，不认可绿证，仅认可绿电直供。法国2023年9月19日发布的根据欧盟委员会能源法案延伸的新能源车辆环境影响计算指南中也明确指出仅认可物理上实现的绿电直供。近几年，中国的零碳产业园模式提供了一种可能的解决方案，在升级后的传统产业园或者全新建的产业园中，园内的风机、光伏、储能与智能物联网协同形成的清洁、稳定、高效的新型电力系统，为电池生产、组装过程提供低碳或零碳能源供给。同时，直供入驻园区内的电池上游合作伙伴，降低正负极、电解液等高耗能制造环节的碳排放，实现整个电池产业链的低碳甚至是零碳。

5.2 电池设计及包装

按外形封装材料的不同，电池又可以分为圆柱型电池、方壳电池、软包型电池。圆柱型电池是采用钢壳作为封装材料，外形为圆柱体的锂电池，按照标准尺寸方便定制各类电池，电池能力密度较高，电芯一致性较好，散热效果好，安全性好，自动化程度高。方壳电池通常采用铝壳或钢壳结构，相对重量轻，能量密度适中，结构较为简单。软包型电池采用铝塑复合膜作为封装材料，外形为扁方形的锂电池，安全性好，不易发生爆炸，质量与钢壳铝壳相比更轻、能量密度高，内阻小，降低电池自耗电，循环寿命较长。

不同封装电池比较（表5）

特征	圆柱型电池	方壳电池	软包型电池
			
外形	长圆柱形	矩形	无规则形状，常见长方形或正方形，边缘为圆角矩形
封装材料	金属壳体结构	通常采用铝壳或钢壳结构	使用铝塑膜材质
能量密度	中	中	高
安全性	低	中	高
工艺要求	低	中	高

除常见的电池设计外，还有一种电池单体电芯呈六棱柱状的设计结构，可以增大电芯的容量，且壳体内可以容纳更多的电解液以延长电池的使用寿命。在多个电芯连接为电池模组时，能够有效提高了空间利用率，由于正六棱柱形的壳体提供了更大的容纳空间，且圆柱形卷绕极芯与壳体的侧壁存在一定间隙，可以降低电池安全性能劣化的风险。

电池设计和包装影响其碳足迹，研究表明棱柱型电池制造相较于圆柱电池，会产生更多碳排。相关研究发现，尽管棱柱形电池设计的样本包含很少，但从收集到的数据显示，棱柱形电池产生的碳排放是圆柱形电池设计的两倍左右。具体而言，圆柱形设计的电池电芯的平均碳足迹结果为51.7 kgCO_{2-eq}/kWh，棱柱形电池设计的结果为114.4kgCO_{2-eq}/kWh²³。棱柱电池能量密度相较于NCM，LFP更低²⁴，需要消耗更多的原材料以达到同等水平的发电量，导致其碳排较高。

²³ Bouter and Guichet.A design process model for battery systems based on existing life cycle assessment results.

²⁴ U. Akasapu and P. Hehenberger, "A Design Process Model for Battery Systems Based on Existing Life Cycle Assessment Results," Journal of Cleaner Production 407 (2023): 137149.



5.3 技术路径

LFP电芯全球平均碳足迹为60kgCO_{2-eq}/kWh左右，通过采用100%绿电进行组装，电池的碳排放量降低到40kgCO_{2-eq}/kWh左右，实现了30%以上的减排效果；若正极和负极生产过程进一步采用50%绿电，将进一步降低了电池的碳排放至34kgCO_{2-eq}/kWh左右；而当正极和负极的生产过程完全采用100%绿电时，电池的碳排放量能够减少至29.4kgCO_{2-eq}/kWh（见图 17）。

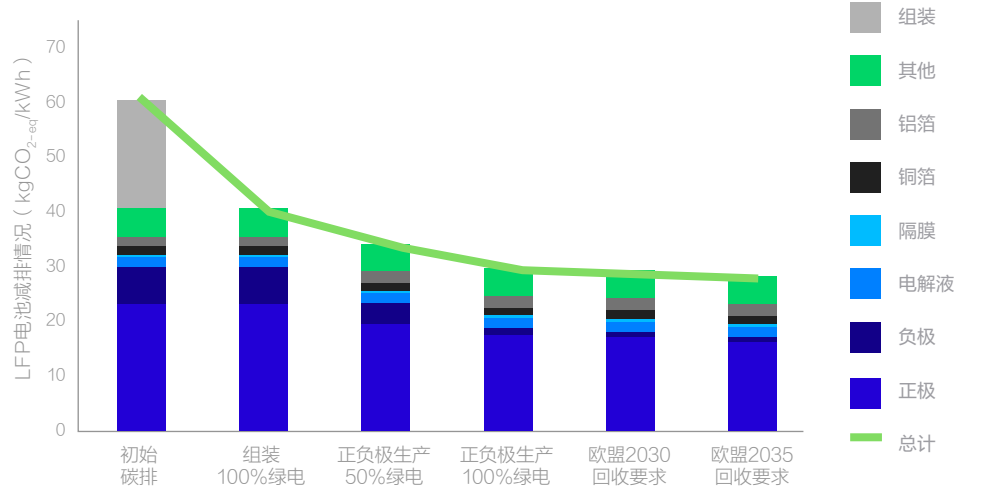
《欧盟电池法》设定了对容量≥2kwh的工业电池，电动汽车电池和活性材料有钴、锂或镍汽车电池，金属回收原材料的要求（表6）。法规生效96个月起，再生材料利用率钴至少16%、锂至少6%或镍至少6%；法规生效156个月起，再生材料利用率钴至少26%、锂至少12%或镍至少15%。

欧盟电池与废电池法规再生原材料的最低占比（表6）

再生原材料含量	钴	锂	镍
时间			
法规生效96个月	≥16%	≥6%	≥6%
法规生效156个月	≥26%	≥12%	≥15%

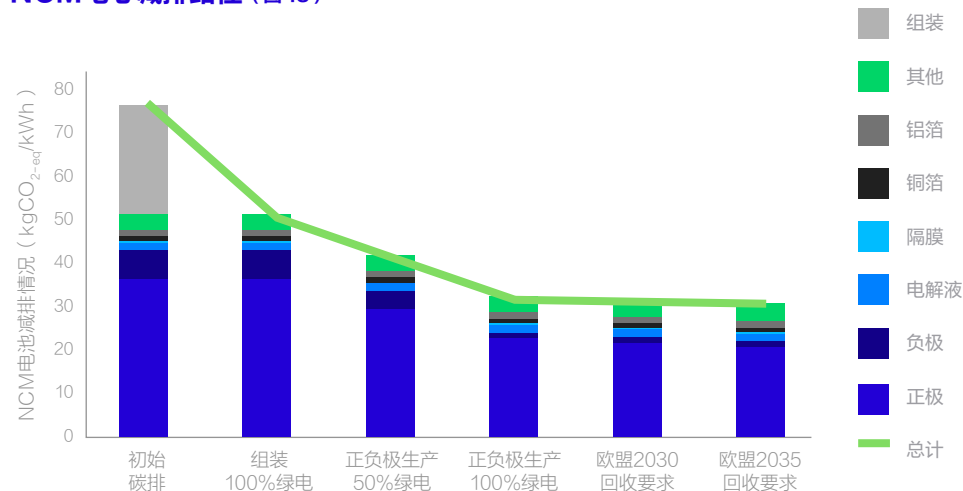
在法规生效96个月欧盟要求的回收目标下，加上组装和正负极生产全部使用绿色电力，LFP电池的碳排放比初始碳排下降52%；依据法规生效156个月的要求，能够使电池的碳排放量减少到27.9 kgCO_{2-eq}/kWh，减排潜力达到53.8%。

LFP电芯减排路径（图17）



NCM相对于LFP的减排潜力更大（图18）。通常NCM的碳足迹略大于LFP，由于其正极活性材料生产过程中用电约20度左右，比LFP用电多（12度左右），在正负极生产和组装和全部使用绿电后，能够减排58.2%。依据法规生效156个月的要求，能使其碳排放降低60.8%。

NCM电芯减排路径（图18）



综上所述，采用绿电、严格的回收要求对减少电池的碳排放起到了积极的作用。未来在更清洁的电力结构和更加完善的回收政策驱动下，电池生产将更加环保和可持续。

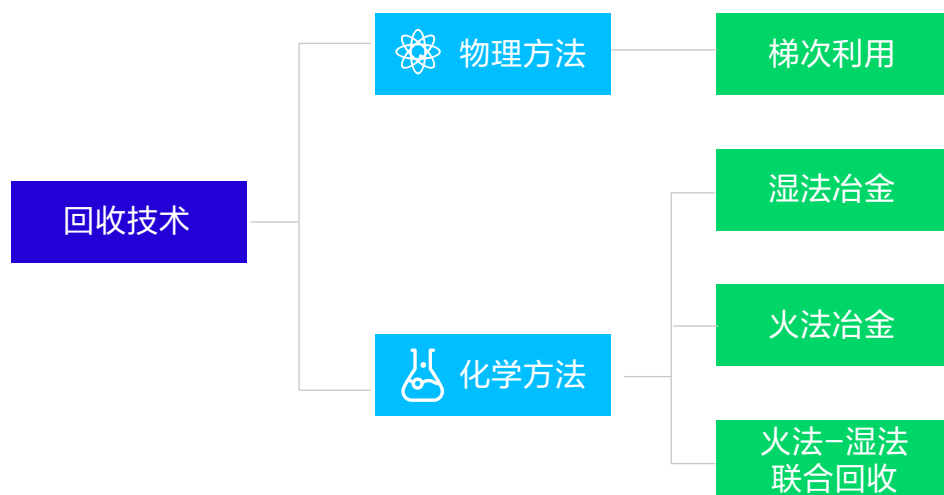
5.4 电池回收

随着新能源汽车与动力电池的产量逐年增加，退役动力电池正爆发式增长，不同电池回收方式对环境影响的研究也越来越多。本章以动力电池不同回收利用技术为研究对象，从全生命周期角度进行环境影响的量化评价，对比不同回收利用技术的全生命周期环境影响，以及回收过程的环境影响和再生产品对原生电池生产的环境影响削减量，以探究电池回收的减排潜力。

5.4.1 回收方法及流程

回收技术一般分为两大类，即物理方法回收和化学方法回收（如图19）。其中，物理回收包括梯次利用，化学回收分为三种具体技术，湿法冶金回收、火法回收和火法-湿法冶金联合回收技术。

动力电池回收技术（图19）



NCM电池含有较多金属，对NCM电池的回收主要是对其正极材料中的有价金属提取。相比之下，LFP电池的正极材料中不包含镍、钴、锰等金属，因此其回收利用略有不同，主要集中在对锂元素的回收。



物理方法

1. 梯次利用

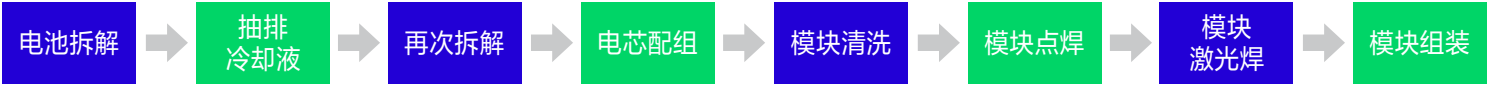
梯次利用是指电池本身并没有损坏，但由于衰减（容量在80%以下）不足以继续支持电动汽车使用，可以退而求其次，在基本同级或降级应用在电力储能、通讯基站后备电源等场景中。这种方式可延长电池使用寿命，充分发挥其剩余价值。

梯次利用根据电池容量的衰减程度分为4个阶段：电池容量不低于80%为使用阶段；当电池容量处于60%-80%，可以进行梯次利用和包装再造，梯次利用之后可应用于储能、通信基站、备用电源等领域；当电池容量处于20%-60%，则直接拆解为单体电池再重组用于用户侧；当电池容量小于20%直接报废处理²⁵。

²⁵ 翁雅青；龙光武；李娅；李金辉，“退役动力电池综合回收研究进展及发展趋势,”生物化工, no. 06 vo 8 (2022): 139-146+152.

LFP电池的梯次利用技术与NCM电池相似（如图20）。废电池经过动力经过拆解、电芯检测和配组、模块清洗、点焊、激光焊和组装，就可以重新得到梯次利用电池包成品。

梯次利用流程图（图20）



2. 直接物理回收

直接物理回收包括对电池进行物理拆解和材料修复结合的方式。首先，通过放电后对电池正负极材料、隔膜、电解液、五金件等组分结构进行精细化拆分，分别回收其中的金属元件、塑料件等；进一步将废旧电池分解成更小的颗粒，根据它们的物理特性（如粒径、密度差、亲水性、导电性和磁性等）将这些混合颗粒分离。正极集电铝箔和负极集电铜箔、隔膜、负极活性物质石墨通过上述工艺回收。通过材料修复的方法对正极粉末进行成分调整，回收的正极活性材料混合有富镍材料、氢氧化锂等，有利于三元正极材料完全再锂化，成为新的正极材料。回收材料可直接用于生产新电池，节约能源和资源消耗。

该技术没有焚烧、酸碱等添加剂反应等环节，环保效能很高，在回收利用率方面有很大的优势。



化学方法

1. 湿法冶金

湿法回收（如图21）是一种常用的废旧锂电池回收方法，具有回收程度高、能耗低、操作简单和技术相对成熟等特点。它通常包括以下步骤：预处理（放电与拆解，机械破碎与分离）、酸（或碱）浸出、杂质分离、溶剂萃取提取有价值金属等。

湿法回收流程图（图21）



在预处理阶段，废旧锂电池经过放电、拆解和粉碎等处理。然后，在酸性（或碱性）溶液中进行浸出，将价值金属从废旧锂电池中溶解出来。随后，通过离子交换、溶剂萃取、化学沉淀、电解等技术对溶液进行分离，将价值金属从溶液中提取出来。

湿法回收也是回收废旧锂电池最常用的方法之一，其工艺具有回收程度高、能耗低、操作简单、技术相对成熟等特点²⁶。缺点是回收流程相对冗长，并且相较于火法冶金方法，成本较高且需要更多的化学试剂。在成熟的酸（碱）浸出过程中，强酸等化学试剂可能产生有毒气体和废酸液等二次污染物。

目前，格林美[®]的电池材料湿法回收技术工艺包括预处理、酸溶浸出和萃取提纯等步骤，该公司也会考虑碳排放情况，采取措施减少环境影响，如使用清洁能源、优化工艺流程和控制尾气排放，以减少对环境的负面影响，为可持续发展做出贡献²⁷。

总的来说，湿法回收是一种有效的废旧锂电池回收方法，然而，为了解决其冗长、成本高和化学试剂带来的污染问题，仍需不断改进和优化回收工艺。

²⁶ Quanwei Chen et al., "Investigating Carbon Footprint and Carbon Reduction Potential Using a Cradle-to-Cradle LCA Approach on Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China," Journal of Cleaner Production 369 (2022): 133342.

²⁷ <https://www.Gem.Com.Cn/Gb/Index.html>

2. 火法冶金

火法回收（图22）先将废旧电池粉碎，再利用高温熔炼烧掉高分子粘结剂和隔膜等有机材料，其中低沸点的金属及氧化物最先回收。分离出的金属物质再通过后续工序分离提纯。通常只靠火法冶金无法获得单一金属，只能得到钴、镍、铜等金属合金，而铝、锂等金属元素进入炉渣中。

火法冶金流程图（图 22）



火法回收优点是其只需对废旧动力电池系统进行简单的拆解和放电，不需要对电池单体继续拆解而直接进行高温冶炼。在高温过程中同时投入造渣剂、还原剂等，通过控制反应条件进行还原熔炼。尽管火法冶金操作简单，适合大规模处理废旧锂电池，但作为能源密集型方法，在操作过程中需要消耗大量能量，并且会产生大量废气、废渣污染环境²⁸，在该过程也会损失一定量的金属锂。

一般在火法回收后，也需要加入浸出等湿法冶金工艺，将这些高价值金属被进一步精炼并以高效率（>95%）回收。现阶段利用火法-湿法联合回收技术回收有价值金属。优美科（Umicore）公司[®]所采用的Val'Eas工艺，针对NCM电池回收，该工艺主要将火法回收技术的产物进一步采用湿法提纯，尽管回收过程中不可避免的产生新“三废”，但该方法对反应对象的要求较低，又可以减少浪费金属元素²⁹。

²⁸ Guannan Qian et al., "Value-Creating Upcycling of Retired Electric Vehicle Battery Cathodes," Cell Reports Physical Science 3, no. 2 (2022): 100741.

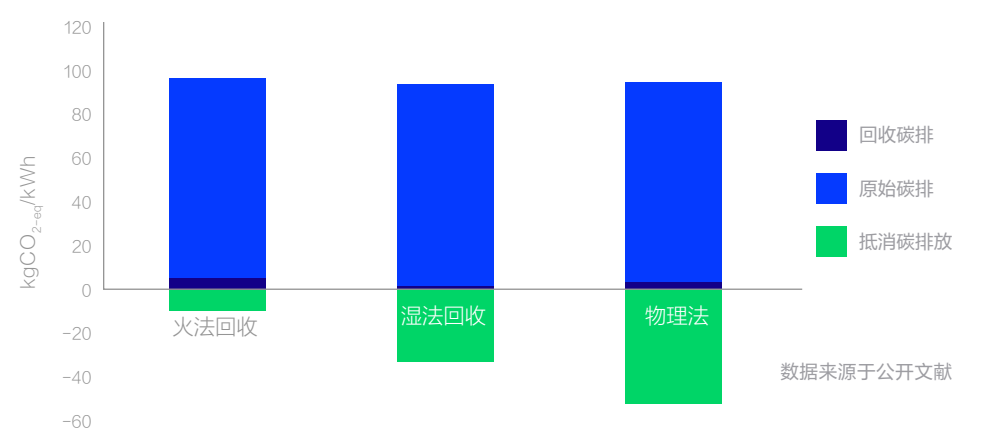
²⁹ <https://www.Umicore.Cn/Zh-s/>

5.4.2 回收方式碳排放评价

提高电池的回收率，能够有效降低电池生产带来的碳排放。使用回收技术、再生材料可以不同程度地减少动力电池生产阶段的污染物排放，可以使锂离子电池生产阶段的碳排放下降。本报告针对容量为74kWh，包含188个电芯的NCM811电池包，量化火法冶金、湿法冶金和直接物理回收碳排放情况，由于火法-湿法联合回收技术数据缺失，未包含在内。

在回收阶段，负碳排放表明对电池总碳排放产生了改善效果，绝对值越大则对生产阶段环境影响的减少越显著。不同的回收技术对电池在生产阶段的环境影响消减程度各有不同。事实上，梯次利用技术产生的再生产品，如电池包，代替了整个电池生命周期从原料开采、电池材料制造、电芯生产到电池系统生产的过程，对于电池全生命周期碳排放的抵消最大，综合表现最好。一般跳过梯次利用阶段，直接比较火法、湿法等相关回收方式的碳排放（图23）。

不同回收方式碳排放比较（针对NCM811）（图23）



在剩余的几种回收技术中，火法回收过程的碳排放量最高，为5.11kgCO_{2-eq}/kWh。通常火法回收使用温度超过1000°C的高温冶炼，碳排放来自冶金过程中消耗的化石能源，会产生许多直接和间接的碳排放。此外，负极中的石墨无法通过火法回收，石墨在高温环境下热解会产生碳排放。

尽管火法冶金需消耗化石能源，碳排放大于湿法回收，但在整体对环境影响方面是优于湿法冶金的³⁰。一般火法回收不太彻底，回收的价值产出不高，电池企业多采用火法、湿法联合回收方式。

湿法冶金碳排放量为2.9kgCO_{2-eq}/kWh，比火法降低47.6%。与火法冶金相比，湿法冶金仅需要在低温条件下进行多步化学处理，没有火法高温处理的高能耗、高碳排放的过程，阳极中的石墨不会转化为二氧化碳增加碳排放。湿法冶金虽然可以实现闭循环利用，但通常包括10多个主要步骤，会产生相当数量的有毒气体和废液。

“物理法”碳排放量为3.65kgCO_{2-eq}/kWh，比火法回收法降低28.6%。由于物理法回收的产品可以直接用于电池生产的材料，减少了材料再生步骤和二次污染，显著降低动力电池生产阶段的能耗。在对正极材料修复中使用热处理过程，该过程的能源消耗是主要来源碳排放。

³⁰王琢璞, “新能源汽车动力电池回收利用潜力及生命周期评价,” 2018, <https://doi.org/10.27266/d.cnki.gqhau.2018.000656>.

对各回收技术碳减排潜力比较，火法冶金对于锂电池再制造的碳减排潜力相对有限，使用火法回收材料比用原材料生产的电池低**4.8%**的碳排放；使用湿法冶金回收材料再制造锂离子电池的碳排放量比使用原材料生产的电池低**33.47%**，这是因为湿法冶金的碳排放远低于火法冶金，并且湿法回收率较高。直接物理回收再制造电池具有最高的碳减排潜力，碳排放量比使用原材料生产的电池低**51.8%**。但物理回收法在技术上还不成熟，还处于小规模试验阶段。

综上，对于锂电池的回收过程应遵循先梯次利用再回收的原则。尽管相关回收技术也会带来一定量的碳排放，但使用再生材料会明显降低电池生产过程的能耗和碳排放，带来环境效益。未来应在保证电池安全性的同时使用替代材料来降低原材料的应用比例。电池的发展除了努力提高其能量密度的同时，还要注意降低碳排放，以及对电池的回收处理和二次利用。



5.4.3 企业回收行动

电池制造关键金属可从废旧电池中回收提取，有效补充资源短缺，从需求端推动回收行业发展。从电池回收的布局来看，除了第三方回收企业，不少电池材料供应商、整车厂等也纷纷布局电池回收。

目前，诸多电池回收企业均部署电池梯次利用，在梯次利用后对电池进行拆解，回收电池相关金属材料。从工艺来看，企业大多选择湿法，因为湿法的工艺温度要求不高，可以减少能耗的使用，减少CO₂的排放。未来多种工艺将优势互补，齐头并进。

对于废旧NCM电池回收来说，大部分企业以湿法+火法为主，节省成本的同时保证了高回收率。对于废旧LFP电池来说，目前还处于起步阶段，只有少数几家已具备回收处理能力（表7）。

国内外典型动力电池回收布局及工艺（表7）

企业性质	公司	NCM电池回收工艺	磷酸铁锂回收工艺
第三方回收	格林美 ^p	湿法+火法	/
	邦普循环	湿法	湿法
	赣锋循环	湿法+火法	湿法+火法
	天奇股份	湿法	湿法
	华友循环	湿法+火法	/
	博萃循环 ^p	湿法	/
	赛德美	/	物理法
电池材料+回收	光华科技	湿法+火法	化学+物理法
	华友钴业	湿法+火法	湿法+火法
	寒锐钴业	湿法	/

来源：公开资料整理

第三方回收

第三方回收公司主要商业模式是将电池拆解之后，回收出原材料再卖给电池厂，其成本主要来源于锂电池内部材料的价格。



整车企业回收

除了第三方回收和布局回收业务的电池材料供应商，整车企业也开始布局动力电池回收。

国内外典型车企电池回收布局（图24）



奔驰^P

也将动力电池回收业务提升和拓展至全球战略层面，扩大在全球范围内的电池回收。目前奔驰在德国已经建设电池回收工厂，回收率将达96%。与此同时，奔驰也计划与中国、美国的相关企业合作，开展动力电池回收利用业务。

比亚迪

在2018年与铁塔公司合作，将回收的比亚迪电池用做基站储能备用。并于2022年4月宣布在浙江台州成立台州弗迪电池有限公司，由比亚迪间接全资持股，经营范围包括电池制造销售、新能源汽车废旧动力电池回收及梯次利用、新材料技术研发等。

特斯拉

在其2021年新的回收系统中，电池材料回收率已达到92%，且在已经开启的电池回收服务中，可以处理不再满足客户需求的任何动力电池，而报废的锂离子电池可实现100%回收利用。2021年，特斯拉共回收1500吨镍、300吨铜和200吨钴。2022年3月，特斯拉在中国的公司将新增新能源汽车废旧动力蓄电池回收及梯次利用服务等纳入其经营范围。

宝马集团^P

于2022年5月，宣布与华友循环携手进行动力电池材料闭环回收与梯次利用，将高比例提炼后的镍、钴、锂原材料100%返回到宝马自有供应链体系，用于生产全新动力电池，以实现动力电池原材料的闭环管理，从而实现资源的循环利用。

此外，上汽集团、吉利^P ^{SBTi}、大众汽车^P、日产^P、本田等车企也在动力电池回收市场进行不同程度的布局。

电池企业回收

全球范围内的电池制造企业也纷纷布局电池回收。其中，远景动力(AESC)^{P SBTi}不仅提供高安全性、高能量密度、高耐久性和高性价比的动力电池，同时关注电池的生产清洁。除了上游供应链，其在美洲、欧洲、日本和中国进行电池回收和再利用，以此形成产业链闭环。

在和宝马^P的合作中，远景动力^{P SBTi}将选择经过认证的矿场的钴和锂作为生产新一代电池的原料，并对其进行循环利用，并在回收方面与美国Redwood Material公司合作，共同打造电池原材料循环利用闭环系统，逐渐提升在原材上的回收利用率。

无论是车企、还是电池企业、材料企业、第三方回收企业通过成立合资公司、签订长协订单等方式，使产业整合度不断提升，产业链上下游合作更加深入。



5.4 企业案例

联合国全球契约组织参与企业中的动力电池产业企业已率先采取行动，开展动力电池生产低碳实践。从上游原材料矿料企业，电池生产制造企业，使用电池的车企到电池回收企业，企业纷纷根据企业实际开展低碳实践，推动全产业低碳发展。

远景动力^{P SBTi}

作为全球领先的电池科技公司，远景动力将减排的方法论应用到了产品全生命周期的各个环节，通过研发低碳产品、改良生产工艺、推进节能降耗、投资可再生能源、开发回收技术、自研数字化工具、建立零碳产业园等措施，在自身减排的同时带动和赋能上下游合作伙伴推行减碳实践。

在产品研发和技术创新上，公司创新电池技术，解决锂电池在低温环境下可利用能量衰减迅速问题。通过优化极片配方、开发低温型电解液等技术，提高能量使用效率，降低动力电池使用过程中的碳排放。在储能电池研发中，公司注重储能电池全生命周期碳排放，开发出12000次超长寿命储能电池，使得全生命周期中锂电池生产过程碳排放减少30%以上。

此外，公司开展了准确高效的基线碳盘查，有序推进各项减排项目管理，明确绿证和碳汇投资原则，着力于碳捕捉和碳消除项目，以第三方认证来保证各维度的工作落到实处。公司在鄂尔多斯零碳产业园内布局10.5GWh的电池产能，园区内100%使用绿电，并吸引、集聚行业上下游企业共同在园区内实现减碳，驱动更大规模的低碳转型和行业的整体变革。基于智能物联操作系统的零碳数字认证应用，远景动力在园区内生产的电芯具备可追溯溯源、符合各类国际标准、经过权威机构认证的“零碳绿码”，以应对国际绿色壁垒。

截至2022年末，远景动力与多家核心供应商达成减排的深度合作，通过公司自研电池供应链碳足迹平台，高效、精准地收集供应商数据，精细化计算产品碳足迹并进行数字化供应链管理，与此同时助力重点供应商计算产品碳足迹，识别排放热点并挖掘减排潜力。远景动力^{P SBTi}携手重点战略供应商共同推进绿电使用比例，逐步减少供应链碳排放。基于数字化工具和碳管理体系，远景动力^{P SBTi}得以制定更有针对性的减排目标和供应链行动计划，推进自身产品碳足迹优化的同时，赋能供应商的绿色转型。在回收方面，公司已与多家公司达成合作，共同打造电池原材料循环利用闭环系统，逐渐提升公司在原材上的回收利用率。

2022年，基于全生命周期方法，公司对提供给奔驰^P的EAHE2201A型号锂离子动力电池进行了从原料开采到生产的碳足迹分析，并通过绿电应用和碳汇采购的方式进行抵消，最终获得国际权威认证机构TÜV南德颁发的认证。2023年，公司储能电芯以同样的方式，获得TÜV南德颁发的碳中和认证。

格林美^P

立足“资源有限、循环无限”的绿色发展理念，通过全球产业布局绿色工厂，打通了“电池回收—资源再造—材料再造—电池包再造”的废旧动力电池利用的全生命周期产业链。实现了废旧动力电池智能化柔性化拆解，开发了退役电池梯次用于成低速车、工程机械、中小储能电池包等应用场景，实现了电池废料变成碳酸锂、镍钴电池材料，解决了新能源汽车电池产业的末端处理产业难题和急需的资源稀缺的难题。通过动力电池的循环利用助力产业链的减排增效，为产业、城市和企业提供了优秀案例。

2022年回收处理动力电池量约占中国10%，多项技术为中国领先，荣获了“保尔森可持续发展奖”。

宁德时代^P

绿色研发与创新：在新技术和解决方案研究阶段，为降低其对环境可能造成的影响，公司将生产端能耗、碳排放、材料回收性能等因素纳入研究中，并针对新技术开展预测式LCA，统筹技术的性能成本与环境影响。同时，公司结合产品碳足迹、水污染影响、土壤污染影响以及生物毒性影响等指标开展预测分析，在确保产品合规的同时实现全方位的绿色低碳。2022年，公司依据ISO14025:2006对储能280Ah LFP电芯产品的全生命周期环境数据进行报告，并成功经由EPD Italy平台取得符合EPD Italy007和EN 50693:2019分类的环境产品声明。

价值链降碳：公司运用供应链审核工具开展可持续透明度审核计划，识别供应商在能源管理、应对气候变化等多方面的表现与能力，并积极为其开展培训赋能。公司结合供应商的管理现状提出可持续发展管理目标与改进要求，目标包括绿电使用比例、循环材料使用比例、碳排放强度以及单位产品能耗等。公司通过现场审核、委托第三方机构及线上会议等方式定期监督供应商在可持续发展绩效目标方面的实现进展。

宝马集团^P

宝马集团^P是第一个加入科学碳目标倡议(SBTi)组织发起的“1.5°C控温目标行动”的德国车企，并制定了2030年全价值链单车二氧化碳排放至少减少40%的中期目标。作为公司全球最大的生产基地，二十余年以来，宝马集团中国致力于全面推进可持续发展战略，并致力于实现“家在中国”的品牌承诺。

宝马集团中国可持续发展蓝图的重要支柱之一是对动力电池管理的重点关注，从而减少碳足迹与环境足迹。在宝马“再生优先”理念的指导下，以“再思考、再减少、再利用、再回收”原则为基础，公司在中国建立了全面且循环的动力电池生命周期管理生态系统。

早在2018年，宝马集团中国已经开发了一套编码系统，以确保动力电池全生命周期的可追溯性。2022年，宝马集团中国与战略合作伙伴利用的创新合作模式，首次实现国产电动车动力电池原材料闭环回收。退役电池中的关键原材料，例如钴、镍、锂等，可以被回收并返回到电池生产供应链，用于新的宝马动力电池生产。与使用原生原材料相比，这一措施可以节约资源并减少70%的二氧化碳排放。对于剩余容量较高的退役电池，宝马集团中国率先将其梯次利用于沈阳生产基地的叉车中，同时不断创新并扩展电池梯次利用的应用场景。

促进零碳排放的动力电池生产是宝马集团中国的另一项重点战略。自2019年起，宝马集团中国沈阳生产基地，包括动力电池中心，实现了100%可再生能源电力使用的转型。此外，公司已经要求现有第五代与未来第六代BMW eDrive系统的所有电池供应商承诺使用100%绿电，以解决上游供应商的范围三温室气体排放问题，实现公司的减排承诺。

天齐锂业^P

天齐锂业^P通过打造里找高值化综合利用产线，实现锂渣的资源化、减量化、无害化处理，同时为下游产业带来低碳、清洁的产品原料。目前公司已开展硅铝微粉、钼铌精矿、高纯石膏、沸石加工等锂渣再利用项目，回收产品应用于建筑、医疗、军工等行业，打造行业废弃物回收示范项目。

为实现2050年的净零目标，公司制定短期、长期碳减排路径。短期内通过可再生能源使用和能效提升实现碳减排，2022年公司已在多个基地开展淘汰高能耗设备、低能耗工艺推广、电器节能改造等能效提升项目；长期路径以研发和资产更新策略为主，探索开发绿电蓄热蒸汽系统、碳中和天然气系统和高效CO₂循环利用系统，具体行动包括，提升电气化水平和可持续燃料占比、使用碳捕集及封存技术等。



总结与建议

随着全球电动车销售量的高速增长，对动力电池的需求也呈现上升趋势。LFP电池和NCM电池是目前电动汽车中应用最广泛的动力电池类型；固态电池是未来可能快速发展的动力电池类型。随着大量废旧电池的退役，退役电池的回收变得至关重要。

越来越多的国家和地区对动力电池的退役、报废和回收给予重视，并制定相应的电池法规。中国的电池企业在这方面处于前沿地位，正在积极开展电池回收行动，实现资源的循环利用，从而推动清洁能源和新能源汽车行业的共同发展。欧盟是最早制定电池法案的地区，实施了生产者责任延伸制度，要求汽车制造商对废旧电池进行回收处理。美国是最大的新能源汽车市场之一，也是最早关注电池回收并采取措施的国家之一。美国拥有健全的电池回收法律体系，涉及联邦、州和地方各级，并且鼓励汽车制造商和消费者参与电池回收计划。新能源汽车和动力电池行业通过加强动力电池回收和再利用，通过技术创新与全产业链合作来推动整个行业的低碳发展，是践行全球发展倡议加速实现可持续发展目标，落实《巴黎协定》的重要举措。

本报告针对电动汽车中最常用的LFP电池、NCM电池和快速发展的固态电池，综合搜集了相关数据，核算分析其碳足迹。比较不同型号动力电池原材料获取和生产制造过程的能耗，以及环境影响。同时，通过比较不同回收技术的减排潜力，提出了电池生命周期的碳减排措施。

6.1 总结

电池

LCA结果表明，随着制造技术的升级和电池标准化核算制度的完善，电池的碳足迹总体呈现明显的下降趋势。由于正极材料含有镍钴锰等重金属，相较于LFP电池，NCM电池在“摇篮到大门”的生命周期产生更多的碳排放。固态电池由于尚未规模化量产，碳排放量较高。

原材料

电池原材料获取环节中，电池的正极活性材料的CO₂排放量最大，尤其是NCM电池；生产制造环节中的超净干燥室需消耗大量的能源，是生产制造过程中耗能的主要环节。此外，电池的生产制造和组装过程中的电力消耗将显著影响电池整个生命周期的碳排放结果，电力的碳排放取决于当地电网的能源结构，使用绿电可以降低NCM的碳足迹约30%。电池设计和包装也会对碳足迹产生影响，棱柱形电池的碳排放大约是圆柱形电池设计的两倍左右。

梯次利用

在回收方法中，梯次利用技术的再生产品作为电池包对电池全生命周期的碳排放抵消效果最明显，具有最高的碳减排潜力。在锂电池的回收过程中，应遵循先梯次利用、再回收的原则。

再生利用

回收正、负极材料中的贵金属元并进行资源再利用，可以抵消原材料获取产生的碳排放。按照欧盟对动力电池的回收要求，NCM电池相较于LFP电池具有更大的减排潜力，其减排潜力可以达到61%。尽管相关回收技术在过程中产生一定量的碳排放，但使用再生材料可以显著降低电池生产过程的能耗和碳排放，从而带来环境效益。

6.2 建议

为推动电池产业的可持续发展，优化电池的环境表现和减少碳排放，本报告提出以下建议：

1. 制定更严格的电池标准

一些发达国家正在以产品生命周期评价、碳足迹为基础建立国际绿色贸易新规和制订动力电池行业统一的衡量测试标准能够为监管部门提供了有效的监督依据。不同标准的相互衔接及组合覆盖了动力电池、模组、系统等各个等级部件，有利于动力电池行业的健康发展。同时，针对包括动力电池能源消耗、材料使用、生产过程和回收要求等方面制订标准，将促使电池制造商采取更规范和环保的生产方式，减少碳排放，并提高整个产业链的可持续性。

2. 建立电池行业碳排因子库

多数国家在电池产品碳足迹核算与评价领域的制度建设和实践操作还比较薄弱，尚未建立统一数据库。通过建立电池行业碳排因子库，能够为电池的碳足迹核算和评价提供可靠的数据基础，促进各方之间的协同合作和信息共享。同时，通过收集和整合具有时间和地域代表性的高质量排放因子，有助于揭示不同行业和地区的碳排放差异，促进技术进步和低碳发展。

3. 加强电池回收与再利用

进一步完善电池回收体系，推动物理回收等高效减排技术的应用，实现电池材料的资源回收和再利用，有助于减少新材料生产过程中的碳排放，同时也可以有效地处理废电池中的有害物质，降低环境污染的风险。建立健全由回收点、回收网络和回收设施构成的回收体系，方便消费者处理废弃电池。加强宣传教育，提高公众对电池回收重要性的认识和意识。鼓励和支持企业投资和开展电池回收与再利用业务，推动相关技术和设备的创新。



发展形势 与展望

推动动力电池碳足迹管理与碳减排是促进电池产业可持续发展，实现新能源汽车产业碳中和的关键任务。国家和企业构建碳足迹管理体系，建立核算工具和数据准确保障机制，有利于实现动力电池产业碳排放的准确核算和管理。同时，国际间需要建立针对标准、方法论等的跨国互认机制，推动不同国家间的碳足迹核算体系相互认可。而跨国头部企业在面临成本上升和技术要求增加的挑战之际，也面临着新型商业合作模式的机遇。基于以上分析，本报告有以下发展趋势预测及展望：

7.1

新能源汽车碳中和发展目标明确，动力电池碳足迹管理与碳减排是当前关键任务之一

电动化交通推动了碳排放的重点向新能源汽车制造和电力生产阶段的转移，降低工业和能源领域碳排放成为双碳战略的核心。电力、交通、工业制造三个领域碳排占70%左右³¹，是碳减排的重点大户。降低化石能源消耗，大力发展风光等新能源产生的绿色电力，实现交通领域电动化，才能有效降低电力、工业制造和交通领域碳排放。

动力电池产业碳减排是首要任务。一方面，根据中汽研报告数据，动力电池制造碳排最高可占电动汽车全生命周期碳排放的40%，可以说是整个电动汽车碳排放大户，是当前碳减排的重点。另外一方面，欧盟、日本等国家和地区已实施或研究制定电池碳排放核算、阈值管理等碳足迹管理政策，对于大型跨国电池企业，进行全球动力电池贸易与投资，开展动力电池领域碳足迹管理与碳减排工作迫在眉睫。

³¹ 碳排放数据来源于清华大学张希良教授报告

7.2

政府和企业亟需构建碳足迹管理体系，相关核算标准、方法论等跨国互认也是未来趋势

动力电池碳足迹管理离不开国家、企业和跨国机构等组织体系的建立，包括国家层面建立碳足迹管理体系，企业层面构建碳管理体系和国际层面的互认机制。



国家电池碳足迹管理体系

建议搭建动力电池碳排放数据管理系统，具体包括核算工具、产业链数据、数据准确保障机制三大部分，全面涵盖动力电池产业链上下游碳排放信息，为国家和企业提供查询、核算、核查、管理等多种功能,可精准反映动力电池行业情况，具体如下：

为落实生命周期评估，需要建立核算工具协助使用者查找、核算、管理和报告与碳足迹相关的数据信息。相关机构可从国际主流数据库中获取各个阶段的温室气体排放清单，梳理出动力电池碳排放数据，包括原料、生产、物流、使用和回收阶段的数据，并建立常态化管理和定期更新机制，以便为碳排放的核算、监管、评估提供数据支持。

为实现碳排放核算，需要完善产业链数据以提供整个供应链的数据事实来源。产业链上下游企业应配合相关机构，遵循数据可得、方法可行、结果可比的原则，尽可能详细准确地根据涵盖所有碳排放阶段的物质清单，统计并录入相关的底层工业数据、供应链企业数据和工业企业数据，以便本系统实现上下游企业数据互联互通。

为确保数据准确，需要建立数据准确保障机制进行监督管理。相关监管机构可对动力电池企业碳排放数据进行监督管理以提高数据质量，包括审核重要数据目录备案，开展监测预警、信息报送和共享、投诉举报受理等工作；同时，相关核查认证机构应为企业 提供碳排放核算功能，实行低碳检测认证等，为企业 提供管理、技术及咨询服务。

企业电池碳足迹管理体系

为了满足欧盟《新电池法》的相关要求和各国国内碳中和计划要求，整车企业和电池企业应积极应对。因此，构建企业电池碳足迹管理体系建设成为当前头部企业高度重视的任务之一。但从总体上来看，企业仍处于碳核算管理的初级阶段，对于未来终极碳中和目标的各阶段任务认识相对较少。从碳管理体系来看，企业应建设包括碳核算（碳足迹确认）、碳资产、碳交易与碳中和（目标管理体系）四大部分管理体系。

碳核算是碳中和终极目标的第一阶段，在此阶段，需要针对动力电池开展核算方法、物料与数据清单确定，通过供应链管理，以及综合测算及开展相关检测认证工作。

在各领域进行碳中和计划过程中，国家可采用市场激励手段，设立跨行业领域的碳资产确认与交易平台。企业在实施各项碳减排方案的过程中，也可以通过经济手段，进行碳资产确认与交易，满足国内外碳足迹阈值要求。碳资产³²是指在强制碳排放权交易机制或者自愿碳排放权交易机制下，产生的可直接或间接影响组织温室气体排放的配额排放权、减排信用额及相关活动³³。

碳中和管理³⁴是指进行碳减排目标的制定，根据自身碳排放情况和行业标准，制定相应的碳减排阶段性目标，包括近期和远期目标。该目标应具有一定的可行性和可量化属性，同时还要考虑到企业的经济效益和社会责任。

³² <https://baike.baidu.com/item/%E7%A2%B3%E8%B5%84%E4%BA%A7>

³³ 吴宏杰.碳资产管理.北京联合出版公司.2015年.

³⁴ https://www.Gov.Cn/Zhengce/2021-10/24/Content_5644613.Htm," n.d.

标准、方法论等跨国互认机制

联合国政府机构逐步开展官方跨国互认工作，通过充分交流与研究加强碳足迹核算标准和要求间互认，在各国标准、方法论与政策研究机构之间建立联合研究机制。2019年全球电池联盟（GBA）提出电池护照倡议，并于2021年后陆续通过G7集团、OCED等国际会议认可³⁵。2022年，德国经济部发放资助助力开发电池碳足迹行业标准，推动电池护照发展。作为在新能源与新能源汽车产业具有全球领先优势的国家，中国在动力电池碳足迹标准、方法论跨国互认工作上起步也比较迅速。6月21日，在中国国务院新闻办公室举行的政策例行吹风会上，中国工业和信息化部代表表示，下一步将促进新能源汽车领域的标准和法规协同，其中将加强与相关国家和地区低碳发展合作，推动形成互相认可的碳排放、碳足迹核算体系³⁶。

³⁵ <https://www.Globalbattery.Org/>, "n.d.

³⁶ 中国工业和信息化部辛国斌副部长在政策例行吹风会上的讲话
<https://www.gov.cn/xinwen/2023zccfh/9/index.htm>

7.3

跨国头部企业 挑战与机遇并存， 新型商业合作新模式 或随之出现

成本方面，为了满足欧盟《新电池法》的相关要求，电池企业应针对原材料采购、电池生产工艺和废旧电池回收处理等环节构建企业内部管理体系，并在相关碳管理目标的基础上，设置相应的碳中和工作任务。一方面可能会导致生产成本上升，另一方面也会倒逼电池企业加速向低碳、零碳的生产方式转变。

欧盟《新电池法》有关碳足迹、数字护照等要求或将改变现有的商业模式。如在电池回收环节，法案制定了明确的回收目标，不仅增加了对相关企业的废旧电池回收处理环节的要求，也对企业的回收技术提出了更高要求，有可能加速“生产端-应用端-回收端”融合发展的新型商业合作模式的产生。

数据隐私和安全也是业内关注焦点。核查过程中将主要对排放单位基本情况、核算边界、核算方法、活动数据、排放因子、排放量、生产数据、质量保证和文件存档、数据质量控制计划及执行情况等进行评审，在必要时还会进行现场核查。核查过程中，有可能带来数据泄露、前沿技术泄露方面的问题，不利于企业的知识产权保护。

联合国全球契约组织将依托“企业践行全球发展倡议，加速实现可持续发展目标”（GDI for SDG）项目深化该领域的研究、促进对话、增进交流、推动合作，在企业间搭建务实行动与合作的机制，帮助确保电动汽车行业成为加速实现可持续发展目标的典范行业。



联合国全球契约组织简介

作为联合国秘书长的一项特别倡议，联合国全球契约组织（The United Nations Global Compact）呼吁世界各地的公司将涵盖人权、劳工标准、环境和反腐败领域的全球契约十项原则纳入其战略和运营。联合国全球契约组织成立于2000年，其使命是通过倡导并促进负责任的企业实践，指导和支持全球工商界推进联合国的价值观和全人类的目标的实现。联合国全球契约组织是当前世界上最大的推进企业可持续发展的国际组织，在超过170个国家拥有超过20,000家企业及非企业会员。联合国全球契约组织凭借无可比拟的能力，将企业与每个致力于推动可持续发展的相关方团结起来，包括联合国、各国政府、民间组织、投资者和学术界。通过社会各界的积极行动与合作，我们可以消除极端贫困与饥饿、打击不平等现象并应对气候变化，确保不让任何一个人掉队。如欲了解更多信息，请访问cn.unglobalcompact.org或在社交媒体平台上关注联合国全球契约组织

联合国全球契约组织“企业践行全球发展倡议，加快实现可持续发展目标全球发展倡议”（GDI for SDG）”试点项目简介

联合国全球契约组织于2022年发起“企业践行全球发展倡议，加速实现可持续发展目标”GDI for SDG试点项目，旨在通过搭建跨部门合作伙伴关系，采取全价值链思维，促成不同行业部门之间的相互协作以及资源和能力整合，探索和落地在环境气候和财务两个维度均可持续的商业模式，从项目落地、思想引领、活动对话等多个维度，加速探索、实践和推广涵盖零碳转型、减塑行动、循环经济、海洋生态、产业创新等全球性议题的解决方案。该试点项目于2022年11月5日，在第五届虹桥国际经济论坛“践行全球发展倡议，建设世界一流企业”平行论坛上发起。

报告知识合作伙伴： 远景科技集团简介

远景科技集团是全球领先的新型能源系统企业。秉持“为人类可持续未来解决挑战”的使命，远景科技集团旗下拥有专注于智能风电、储能系统及绿氢解决方案的远景能源、智能电池企业远景动力、开发全球领先智能物联操作系统的远景智能，管理远景-红杉百亿碳中和基金的远景创投，以及电动方程式世锦赛年度总冠军车队——远景电动方程式车队。远景持续推动风电和储能成为“新煤炭”，电池和氢燃料成为“新石油”，智能物联网成为“新电网”，零碳产业园成为“新基建”，培育绿色“新工业”体系，开创美好零碳世界。

2022年，远景荣膺“福布斯中国最佳雇主”榜单前十；2021年，荣登《财富》杂志“改变世界的公司”全球榜单第二位；2019年，荣登全球权威机构《麻省理工科技评论》“2019年全球50家最聪明公司”榜单前十。远景设立于中国、美国、德国、丹麦、新加坡、日本等国家的研发中心，引领全球绿色科技创新与最佳实践。2021年，远景加入科学碳目标倡议（SBTi）并承诺实现“1.5° C的企业雄心(Business Ambition for 1.5° C)”。远景科技集团已于2022年底实现运营碳中和，将于2028年底实现价值链碳中和。

缩略词

IEA	国际能源署
ACEA	欧洲汽车制造商协会
LFP	磷酸铁锂
NCM	三元电池
LCA	生命周期评价
CFP	产品碳足迹
SLI	启动，照明，点火
PVDF	聚偏氟乙烯
NMP	N-甲基吡咯烷酮
PP	聚丙烯
PET	聚乙烯
OEM	原始设备制造商
BMS	电池管理系统
BCU	电池控制单元
ThMU	电池热管理系统
SOH	电池健康状态

联合国可持续发展17 项目标

联合国可持续发展目标呼吁全世界共同采取行动，消除贫困、保护地球、改善所有人的生活和未来。17项目标于2015年由联合国所有会员国一致通过，作为2030年可持续发展议程的组成部分。该议程为世界各国在15年内实现17项目标指明了方向。



联合国全球契约十项原则简介

企业可持续发展始于公司的价值体系以及基于原则的经商之道。这意味着至少要在人权、劳工标准、环境和反腐败领域履行基本责任。负责任的企业在其经营的任何地方都会遵守执行相同的价值观和原则，并且理解在一个区域的良好实践并不会抵消在另一个区域所造成的危害。通过将联合国全球契约十项原则纳入企业战略、政策和程序流程，建立诚信文化，企业不仅要维护对人类和地球的基本责任，而且还要为其自身的长期成功奠定基础。联合国全球契约十项原则来自于《世界人权宣言》、国际劳工组织的《关于工作中的基本原则和权利宣言》、关于环境和发展的《里约宣言》以及《联合国反腐败公约》。

人权

原则一：企业应该尊重和维持国际公认的各项人权

原则二：企业决不参与任何漠视与践踏人权的行为

劳工标准

原则三：企业应该维护结社自由，承认劳资集体谈判的权利

原则四：企业应该消除任何形式的强迫性劳动

原则五：企业应该支持消灭童工制

原则六：企业应该杜绝任何在用工与职业方面的歧视行为

环境

原则七：企业应对环境挑战未雨绸缪

原则八：企业应该主动增加对环保所承担的责任

原则九：企业应该鼓励开发和推广环境友好型技术

反腐败

原则十：企业应反对一切形式的贪污，包括敲诈勒索和行贿受贿

联合国全球契约十项原则来自于《世界人权宣言》、国际劳工组织的《关于工作中的基本原则和权利宣言》、《里约热内卢环境与发展宣言》以及《联合国反腐败公约》。

如欲了解更多信息，请访问unglobalcompact.org/what-is-gc/mission/principles。如需获得更多联合国全球契约组织相关信息，请发送邮件至：ungc.china@unglobalcompact.org。