

退役动力电池再生利用的碳足迹与生命周期评价研究进展

王 琦

安徽嘉奇能源科技有限公司商务部, 安徽 芜湖

收稿日期: 2026年6月30日; 录用日期: 2026年7月10日; 发布日期: 2026年8月21日

摘 要

动力电池在新能源汽车全生命周期碳排放中占比较高, 其原材料获取与正极材料制造是主要排放来源, 再生利用被视为削减电池碳足迹的重要途径。本文以生命周期评价(LCA)为分析框架, 梳理再生利用碳足迹研究的方法学要点, 比较物理预处理、火法冶金、湿法冶金、直接再生和截断式湿法等技术路线的碳排放特征, 分析电池化学体系、用能结构、回收率和再生材料替代等关键影响因素, 并对照中国与欧盟在电池碳足迹核算和再生利用方面的政策与标准进展。研究表明, 再生利用相对原生材料生产具有明显减排潜力, 但量化结果受系统边界、分配方法和本地化清单数据影响较大, 差异显著。未来应推进核算方法统一、本地化数据库建设和低碳工艺优化, 并加强标准互认, 以充分释放再生利用的减排价值。

关键词

退役动力电池, 再生利用, 碳足迹, 生命周期评价, 循环经济

Research Progress on Carbon Footprint and Life Cycle Assessment of Retired Power Battery Recycling

Qi Wang

Commerce Department, Anhui Jiaqi Energy Technology Co., Ltd., Wuhu Anhui

Received: June 30, 2026; accepted: July 10, 2026; published: August 21, 2026

Abstract

Power batteries account for a large share of the life-cycle carbon emissions of new energy vehicles, and raw material acquisition and cathode material production are the dominant emission sources;

文章引用: 王琦. 退役动力电池再生利用的碳足迹与生命周期评价研究进展[J]. 低碳经济, 2026, 15(3): 267-273.
DOI: 10.12677/jlce.2026.153027

recycling is therefore regarded as an important pathway to reduce the battery carbon footprint. Within the framework of life cycle assessment (LCA), this paper reviews the methodological essentials of carbon footprint studies on battery recycling, compares the carbon emission characteristics of technology routes including physical pretreatment, pyrometallurgy, hydrometallurgy, direct regeneration and truncated hydrometallurgy, analyzes key influencing factors such as battery chemistry, energy structure, recovery rate and secondary material substitution, and examines policy and standard developments on battery carbon footprint accounting and recycling in China and the European Union. Studies show that recycling has evident emission reduction potential relative to primary material production, but the quantitative results are strongly affected by system boundaries, allocation methods and localized inventory data, leading to considerable discrepancies. Future efforts should promote harmonized accounting methods, localized life-cycle database development and low-carbon process optimization, and strengthen mutual recognition of standards, so as to fully realize the emission reduction value of battery recycling.

Keywords

Retired Power Battery, Recycling, Carbon Footprint, Life Cycle Assessment (LCA), Circular Economy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新能源汽车产业快速发展带动动力电池需求持续增长, 2024 年全球电动汽车销量超过 1700 万辆, 动力电池需求超过 950 吉瓦时[1]。随着早期装机电池进入退役期, 废旧动力电池产生量上升, 2030 年前后我国将进入规模化退役阶段, 年产生量达到百万吨级, 其处置方式直接影响电池产品的全生命周期环境表现。在碳达峰碳中和目标下, 动力电池的碳足迹日益受到关注。中国汽车动力电池产业创新联盟数据显示, 2023 年我国动力和其他电池累计产量约 778.1 吉瓦时[2]; 动力电池是新能源汽车生产阶段碳排放的重要来源, 电池容量越大, 其在整车碳排放中的占比越高。研究普遍认为, 电池碳足迹主要来自材料获取与正极材料制造阶段, 部分研究指出原材料获取可占电池生产碳足迹的较高比例, 提高再生材料使用比例是削减电池全生命周期碳排放的有效途径[3]。再生利用通过回收锂、镍、钴等金属替代原生矿开采与冶炼, 理论上可降低材料生产环节的碳排放, 但其实际减排效果取决于回收工艺、能源结构和核算方法。近年来国内外关于动力电池再生利用碳足迹的研究快速增多, 研究对象从单一金属回收扩展到正极材料和整包电池, 方法上也从单纯的碳排放核算发展为多影响类别的综合评价, 但结论分散、可比性不足的问题仍然突出。本文从生命周期评价的角度, 系统梳理再生利用碳足迹的研究方法、技术路线差异、关键影响因素与政策标准, 并讨论存在的问题与发展方向, 以期对相关核算与低碳工艺选择提供参考。厘清再生利用的碳足迹特征及其影响因素, 对评估电池循环利用的环境价值、引导工艺升级和应对国际绿色贸易规则均具有现实意义。在国内外标准加速出台的背景下, 开展系统的研究综述也有助于把握方法演进和政策走向。

2. 生命周期评价方法学

生命周期评价依据 ISO 14040 和 ISO 14044 标准, 包括目标与范围确定、清单分析、影响评价和结果解释四个步骤, 是评估再生利用环境影响的主要工具。在碳足迹研究中, 常用的影响指标为全球变暖潜

值(GWP),以二氧化碳当量表示;同时再生利用还涉及资源消耗、酸化、水耗和毒性等影响类别,本文聚焦碳足迹,但需注意各类影响之间可能存在权衡,例如某些低碳工艺可能伴随较高的水耗或试剂消耗,单一指标评价容易产生误导。

功能单位和系统边界的设定直接影响结果。再生利用研究多以单位电池容量(如每千瓦时)或单位回收金属、单位正极材料为功能单位;系统边界可分为从摇篮到大门、从摇篮到坟墓,以及仅针对回收过程的大门到大门。回收阶段的清单通常涵盖收集运输、放电拆解、破碎分选、冶炼提纯及废水废气处理等环节,清单数据可来自企业一手实测或通用数据库,数据来源和本地化程度对结果影响显著。在整车层面的生命周期评价中,再生利用既可作为退役阶段单独核算,也可通过提供再生材料降低生产阶段的碳排放,两种处理对应不同的系统边界,需在研究目标中事先界定,避免重复计算或遗漏。

清单数据的质量取决于来源、时间和地域代表性。现有研究多采用 ecoinvent、GREET 等通用数据库,国内则逐步建设本地化生命周期数据库以反映中国电网和工艺特征。在国际通用数据库方面,ecoinvent 是目前全球规模最大、透明度较高的单元过程清单数据库,其 3.x 版本引入了多种系统模型与分区域电力清单,被广泛用作电池 LCA 的背景数据[4];美国阿贡国家实验室基于 GREET 模型开发的 EverBatt 是首个公开的电池闭环回收成本与环境影响模型,内置火法、湿法和直接回收等工艺模块,并支持美国、中国等不同区域情景的比较[5]。但通用数据库多以欧美平均工艺和电力结构为基础,直接套用会系统性偏离中国实际。在本地化数据库方面,四川大学与亿科环境联合开发的中国生命周期基础数据库(CLCD)以中国市场平均水平为代表,覆盖电力、煤炭、运输等基础过程,是国内电池碳足迹研究常用的背景数据来源[6];宋晓聪等基于 CLCD 的电力、热力与交通碳足迹因子构建了废旧三元锂电池湿法回收碳足迹模型,测算定向循环和循环再造工艺的碳足迹分别为-2760.90 g/kg 和-3752.78 g/kg (以 CO₂ 当量计),并用误差传播方程量化出 15%~16%的不确定性,体现了本地化因子对结果可信度的支撑作用[7]。2024 年,清华大学牵头发布了开放透明的“天工”LCA 数据库,收录中国 55 个行业 4000 余个单元过程、70,000 余条数据,为电池及回收行业提供了可追溯的公共数据基础[8];生态环境部也开始定期发布全国及分区域电力碳足迹因子(2025 年 10 月公布了 2024 年电力碳足迹因子数据),为统一电力背景数据提供了官方依据[9]。总体来看,数据库选择与本地化程度已成为不同研究碳足迹结果差异的重要来源,跨数据库比较时需检验电力结构、上游清单和系统模型假设的一致性。此外,由于回收过程同时处理多种电池并产出多种金属,存在多功能性问题,需要通过物理或经济分配加以处理,处理方式的选择会影响各产品分摊的碳排放。

分配方法是结果差异的重要来源。再生利用同时消耗能源物料并产出可替代原生材料的二次资源,如何处理回收带来的环境信用,存在截断法和避免负担法(系统扩展)两种主流处理方式。前者不计回收产品替代原生材料的减排信用,后者将其作为环境收益扣减,二者结果可能相差较大。这也是不同研究碳足迹数值难以直接比较的主要原因之一,因此结果解释应明确假设并辅以敏感性分析。对于关键参数如电网排放因子、回收率和分配比例,宜采用情景分析或概率方法量化不确定性,以增强结论的稳健性。在避免负担法下,再生材料的减排信用等于其替代的原生材料生产碳排放与回收过程自身碳排放之差,因此原生材料的碳强度越高、回收过程越清洁,净减排越大;这一逻辑解释了为何镍钴等高碳强度金属的回收减排收益通常高于锂铁磷体系。

3. 再生利用技术路线及其碳足迹特征

退役电池再生通常以物理预处理为前端,经放电、拆解、破碎和分选得到电极粉料(黑粉),其能耗相对较低,但分选纯度影响后续金属回收效率。分选得到的黑粉既可进入湿法或火法提取金属,也可作为直接再生的原料,前端工艺选择对后续路线和整体碳足迹有重要影响。在此基础上,主要冶炼路线包括火法和湿法。

火法冶金通过高温熔炼将金属富集为合金，对来料要求低、处理规模大，可处理混合和破损电池，但能耗和碳排放较高，锂等元素易进入炉渣而难以回收，烟气处理负担较重，环境表现相对较差。湿法冶金通过酸浸、萃取和提纯获得电池级金属盐，金属回收率 and 产品纯度较高，是目前应用最广的路线；其碳排放低于火法，但需消耗硫酸、过氧化氢和萃取剂等化学品，产生的含氟和重金属废水处理难度大。对三元电池的对比研究显示，湿法路线的气候变化影响较火法约低 24.4% [10]。

在工程实践中，火法与湿法常组合使用，即先熔炼富集再湿法提纯；近年来还发展出锂优先提取工艺，在浸出前端先回收锂以提高锂回收率并减少损失。直接再生力图保留并修复正极材料的晶体结构后再利用，通过补锂和热处理恢复电化学性能，省去金属分离与重新合成步骤，能耗和碳排放较低，对磷酸铁锂等材料尤为适用，但对来料一致性要求高，目前多处于中试和示范阶段[11]。Ciez 和 Whitacre 对美国情景下三种回收路线的比较测算表明，直接正极回收的温室气体减排效果优于火法和湿法冶金[12]；Xu 等提出的“靶向修复”直接再生工艺以低温水溶液补锂结合快速退火再生磷酸铁锂正极，进一步验证了该路线的低能耗与低排放优势[13]。在湿法基础上发展的截断式工艺，跳过部分金属深度提取、直接制备前驱体或正极材料，可进一步降低碳足迹、水耗和毒性，被认为是低碳方向之一。已有系统综述与元分析指出，回收每千克废旧锂离子电池的温室气体排放在约 0.158 至 44.59 千克二氧化碳当量之间，区间极宽，其中浸出和金属提取环节通常贡献较大[14]。这提示降低提取环节的试剂消耗和能耗，是缩减再生碳足迹的关键着力点。该元分析还发现，联合火法——湿法工艺在温室气体和能耗方面表现最优、火法最差，磷酸铁锂电池的回收碳足迹高于三元电池，且在各影响因素中梯次利用的作用最为突出[14]。据行业研究估算，再生利用可抵消电池生产阶段约 5%至 50%的碳排放，区间较宽，反映出工艺路线与核算条件的显著影响[3]。总体而言，直接再生与截断式湿法的减排潜力较大，火法相对较弱，但各路线的适用性还需结合回收率、产品质量和经济性综合判断。从现有数据看，火法路线的碳排放通常最高，湿法居中，直接再生和截断式湿法较低；但不同研究因系统边界和分配方法不同，绝对数值差异可达数倍，跨研究比较时应谨慎。各技术路线的碳足迹特征比较见表 1。

Table 1. Comparison of carbon footprint characteristics of major recycling technology pathways
表 1. 主要再生利用技术路线的碳足迹特征比较

技术路线	工艺要点	锂回收	能耗与碳排放	成熟度
物理预处理	放电、拆解、破碎、分选得电极粉料(黑粉)	—	相对较低	成熟
火法冶金	高温熔炼将金属富集为合金	较难，易入炉渣	高，烟气处理负担重	成熟
湿法冶金	酸浸、萃取、提纯获电池级金属盐	高	中等，化学品与废水负担较重	成熟、应用最广
直接再生	补锂并修复正极晶体结构后再用	高(结构保留)	较低	中试/示范
截断式湿法	跳过深度提取，直接制备前驱体或正极	高	较低	发展中

注：综合文献[3] [10]-[12] [14]整理；定性为主，具体数值随工艺与体系而异。

4. 影响碳足迹的关键因素

第一是电池化学体系。三元电池镍钴含量高，再生替代原生金属的减排收益较大；磷酸铁锂电池金属价值低，减排信用有限，碳足迹核算结果对分配方法更为敏感，直接再生对其更具优势。第二是用能结构与地理位置。回收和冶炼过程电耗较高，电网清洁程度直接影响碳排放强度。有研究表明，在电网

较清洁地区进行回收与制造，可使镍钴锰正极材料的碳足迹较中国降低约 16% [15]，说明提高绿电比例是降低再生碳足迹的重要手段。Chen 等采用“从摇篮到摇篮”边界对中国电动汽车锂电池的核算亦表明，提高再生材料替代比例可显著降低电池生产阶段的碳排放[16]。由于电网持续脱碳，碳足迹具有时间动态性，采用静态电网因子可能高估未来的排放，核算中宜考虑电力结构的变化趋势。第三是回收率与材料替代水平。回收率越高、再生材料替代原材料的比例越大，全生命周期减排越明显，这也是各国设定回收率和再生比例目标的依据。第四是预处理与运输。退役电池按危险品贮存运输，跨区域转移距离、放电拆解和破碎等预处理均会增加能耗与排放；此外，处理设备的规模效应和来料类型(生产边角料与真正退役电池)也会影响单位碳排放。李建西等对退役三元锂电池循环利用系统的减碳效率评估表明，优化回收网络布局与运输组织可明显提升系统的减碳效率[17]。利用生产环节边角料的回收清单往往优于真实退役电池，若据此推广可能高估实际减排效果。第五是辅料与能量回收。湿法所用酸、碱和萃取剂的上游生产也带来排放，而火法的余热回收和湿法的试剂循环则可部分抵消碳足迹，核算时应纳入考虑。

5. 政策与标准进展

在碳达峰碳中和目标和绿色制造要求下，中国正加快构建产品碳足迹管理体系。2024 年 6 月，生态环境部等十五部门联合印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》，提出优先制定动力电池等重点产品碳足迹核算规则标准，并推进本地化生命周期数据库建设[18]。2025 年 3 月，生态环境部公开征求《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 动力电池（征求意见稿）》意见，明确量化方法与系统边界[19]；行业标准 QC/T 1247-2025 对汽车动力蓄电池碳足迹量化方法作出规定[20]；同时启动大动力型锂离子电池产品碳足迹标识认证试点，推动核算结果向认证和标识转化[21]。

欧盟《电池与废电池法规》((欧盟)2023/1542)对碳足迹和再生利用提出强制要求。法规要求电动汽车电池等申报碳足迹并经第三方核验，自 2027 年起通过电池护照和二维码公开信息，并将逐步引入碳足迹分级和限值；规定再生材料最低含量，自 2031 年 8 月起钴、锂、镍的再生比例分别不低于 16%、6%、6%，2036 年进一步提高至 26%、12%、15%；并设定关键金属回收率目标，锂由 2027 年的 50%提高到 2031 年的 80%，钴、镍、铜由 90%提高到 95% [22]。这意味着碳足迹和再生材料含量正成为市场准入条件。行业层面，联合国全球契约组织发布的《动力电池碳足迹及低碳循环发展白皮书》等也强调以再生材料和绿色电力降低电池碳足迹[23]。中国与欧盟在核算口径、数据库和认证规则上的差异，对再生材料的国际互认和电池出口提出了新的要求。对以欧盟为重要出口市场的中国电池产业而言，碳足迹和再生材料要求可能形成新的绿色贸易壁垒，需提前布局核算能力与数据基础。中国与欧盟主要政策和标准的对比见表 2。

Table 2. Comparison of major policies/standards on carbon footprint and recycling of power batteries between China and the EU
表 2. 中国与欧盟动力电池碳足迹与再生利用主要政策/标准对比

维度	中国	欧盟
碳足迹核算	碳足迹管理体系实施方案(2024)、动力电池核算标准 征求意见稿(2025)、QC/T 1247-2025	(EU) 2023/1542 要求申报碳足迹并 经第三方核验
碳足迹标识/披露	大动力型锂离子电池碳足迹标识认证试点(2025)	电池护照与二维码(2027 起)，并将 引入碳足迹分级与限值
再生材料含量	暂未作强制规定	2031 年起钴 16%、锂 6%、镍 6%， 2036 年提高至 26%、12%、15%
关键金属回收率	综合利用规范条件设冶炼回收率指标	锂 50%→80% (2031)，钴、镍、铜 90%→95%
监管载体	全国动力电池溯源平台、电池编码	电池护照、尽职调查

注：综合文献[18]-[22]整理。

6. 挑战与展望

当前研究与实践仍存在若干挑战。其一，方法学不统一。功能单位、系统边界和分配方法的差异使碳足迹结果可比性差，避免负担法与截断法的选择尤其影响减排结论。其二，本地化清单数据不足。多数研究依赖通用数据库，难以反映中国电网结构和实际工艺水平，一手数据公开程度有限，结果存在偏差。企业出于商业保密较少公开实测清单，进一步限制了核算的准确性与可重复性。其三，退役电池异质性强。来料状态、化学体系和健康状态差异大，且再生材料可能存在性能降级，增加了核算和工艺优化难度。其四，激励与监管衔接不足，碳足迹核算结果尚未充分与回收准入、绿色采购和财税政策挂钩，企业开展低碳改造的动力有限。

针对上述挑战，未来研究可从五个方向深化。一是方法学协调与结果再分析。建议在 ISO 14040/14044 与欧盟产品环境足迹(PEF)框架下，建立针对电池回收的功能单位、系统边界与分配方法“协调议定书”，并对已发表结果开展系统调和(harmonization)与元分析，将截断法与避免负担法的结果换算至统一口径，形成分技术路线、分电池体系的可比碳足迹基准区间。二是本地化与动态化的数据基础。依托“天工”数据库、CLCD 及官方电力碳足迹因子，建立覆盖收集-运输-拆解-冶炼全链条、可公开复核的中国回收工艺清单集；发展前瞻性生命周期评价(prospective LCA)，耦合电网脱碳情景与电池技术演进，评估 2030 年、2060 年等时间断面下再生利用的动态减排价值，避免静态电网因子导致的系统性偏差。三是低碳工艺的定向优化。围绕浸出与金属提取这一碳排放热点环节，量化绿电替代、试剂再生循环、余热回收和锂优先提取等措施的减排潜力；研究直接再生从中试走向规模化过程中的放大效应，明确来料分选纯度、补锂工艺与再生材料性能之间的耦合关系，重点突破磷酸铁锂体系“低残值、高保有量”条件下经济性与减排效益的协同路径。四是数据获取与核算的智能化。结合电池护照、溯源编码和企业计量数据，发展基于实测数据流的自动化清单构建与碳足迹动态核算方法，并采用蒙特卡洛模拟等概率手段量化关键参数的不确定性，提高结果的透明度与可重复性。五是环境-经济-资源多目标协同评价。将碳足迹与水耗、毒性、资源枯竭及技术经济分析集成，系统评估再生材料降级使用、梯次利用与再生利用衔接等情景的综合效益，为回收准入、绿色采购和碳减排激励政策提供量化依据；同时前瞻布局钠离子电池等新体系的回收评价方法，并推进中欧核算规则在电力因子、再生材料信用等关键参数上的互认衔接，为再生材料应用和电池出口提供支撑。

7. 结语

再生利用是降低动力电池全生命周期碳排放的重要手段，其减排潜力已得到较多研究支持，但量化结果受方法学和数据条件影响较大。随着中国碳足迹核算标准逐步出台、欧盟电池法规相关要求陆续实施，碳足迹正从研究指标转变为产业和贸易的约束条件。提高方法一致性、完善本地化数据并优化低碳工艺，将是再生利用充分发挥环境价值的关键，也是支撑动力电池产业绿色循环发展的基础。随着核算规则完善和低碳工艺成熟，再生利用有望在保障关键金属供给的同时，成为电池产业减碳的重要支点。

参考文献

- [1] International Energy Agency (2025) Global EV Outlook 2025. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- [2] 动力电池装机量持续提升 头部企业降本增效抢市场[EB/OL]. 2024-01-25. <http://www.news.cn/auto/20240125/21090b342bf6482085f9cb12e827d661/c.html>, 2026-06-29.
- [3] 车百智库研究院, 自然资源保护协会. 动力电池回收: 构建绿色循环体系[R/OL]. 2025-12. <https://www.nrdc.cn/Public/uploads/2026-02-06/6985a218c7854.pdf>, 2026-06-29.
- [4] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. and Weidema, B. (2016) The Ecoinvent Database Version 3 (Part I): Overview and Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **21**, 1218-1230.

- <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- [5] Dai, Q., Spangenberg, J., Ahmed, S., *et al.* (2019) EverBatt: A Closed-Loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model. Argonne National Laboratory. <https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/07/153050.pdf>
 - [6] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
 - [7] 宋晓聪, 杜帅, 谢明辉, 等. 废旧三元锂离子电池回收利用碳足迹[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3459-3467.
 - [8] 清华大学. 清华牵头首个开放透明碳足迹数据库“天工 LCA 数据库”正式发布[EB/OL]. 2023-11-30. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1182/108332.htm>, 2026-06-29.
 - [9] 关于发布 2024 年电力碳足迹因子数据的公告[EB/OL]. 2025-10-24. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202510/t20251024_1130734.html, 2026-06-29.
 - [10] Islam, M.T., Ali, A., Abdul Qadir, S., Shahid, M., Shumon, R., Monjurul Hasan, A.S.M., *et al.* (2025) Decarbonizing Transport through Circular Battery Solutions: Life Cycle Impacts of Hydrometallurgy vs Pyrometallurgy in NMC Battery Recycling. *Journal of Power Sources*, **658**, Article ID: 238246. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238246>
 - [11] Pang, D., Wang, H., Zeng, Y., Han, X. and Zheng, Y. (2025) Sustainable Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes: Life Cycle Assessment, Technologies, and Economic Insights. *Nanomaterials*, **15**, Article No. 1283. <https://doi.org/10.3390/nano15161283>
 - [12] Ciez, R.E. and Whitacre, J.F. (2019) Examining Different Recycling Processes for Lithium-Ion Batteries. *Nature Sustainability*, **2**, 148-156. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>
 - [13] Xu, P., Dai, Q., Gao, H., Liu, H., Zhang, M., Li, M., *et al.* (2020) Efficient Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes by Targeted Healing. *Joule*, **4**, 2609-2626. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.10.008>
 - [14] Li, J.J., Li, L.L., Yang, R.R. and Jiao, J. (2023) Assessment of the Lifecycle Carbon Emission and Energy Consumption of Lithium-Ion Power Batteries Recycling: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Energy Storage*, **65**, Article ID: 107306. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107306>
 - [15] Hanna, F., Somers, C. and Anctil, A. (2025) Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Battery Recycling: Evaluating the Impact of Recycling Methods and Location. *Environmental Science & Technology*, **59**, 14432-14443. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c13838>
 - [16] Chen, Q.W., Lai, X., Gu, H.H., Tang, X., Gao, F., Han, X., *et al.* (2022) 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**, Article ID: 133342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133342>
 - [17] 李建西, 宋小龙, 潘京津, 等. 退役三元锂电池循环利用系统减碳效率评估及优化分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(1): 488-496.
 - [18] 关于印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》的通知[EB/OL]. 2024-06-04. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202406/t20240604_1074986.html, 2026-06-29.
 - [19] 温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 动力电池（征求意见稿）[EB/OL]. 2025-03-28. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202503/W020250328550123536021.pdf>, 2026-06-29.
 - [20] QC/T 1247-2025. 温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 汽车动力蓄电池[S/OL]. 北京: 中国标准出版社, 2025. <https://hbba.sacinfo.org.cn/stdDetail/b89be837d1206da7c451864c47d50df056d25bd4835f22fd7d229979a6a3d67>, 2026-06-29.
 - [21] 国家认监委秘书处关于印发第一批产品碳足迹标识认证专用实施规则（试行）的通知[EB/OL]. 2025-09-03. https://www.cnca.gov.cn/zwxx/tz/2025/art/2025/art_d9f992834ecd475eab8ccff123137976.html, 2026-06-29.
 - [22] (2023) Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 Concerning Batteries and Waste Batteries, Amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and Repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>
 - [23] 联合国全球契约组织. 动力电池碳足迹及低碳循环发展白皮书[R/OL]. 2023-09. <https://www.cii.org/resource/upload/zbh/202404/02100650dm9x.pdf>, 2026-06-29.