



基于全生命周期方法的 5 种典型储能电池环境影响评价

田西^{1,2,3,✉}, 胡志康³, 马清源³, 彭菲³, 魏国恩⁴, 徐明⁵, 彭爱平⁶

1. 南昌大学中国中部经济社会发展研究中心, 南昌 330031; 2. 南昌大学流域碳中和教育部工程研究中心, 南昌 330031; 3. 南昌大学经济管理学院, 南昌 330031; 4. 南昌大学资源与环境学院, 南昌 330031; 5. 清华大学环境学院, 北京 100084; 6. 赣锋锂业集团股份有限公司, 新余 336600

摘 要 当前锂电池和铅蓄电池占据储能电池 97% 的市场份额, 本研究选取其中 5 种典型储能电池为对象, 基于全生命周期评价方法, 对它们的环境影响进行对比分析。综合考虑了电池容量和循环次数, 以 1 kWh 能量传递为功能单元, 利用 CML-IA baseline 方法, 在全球变暖、人体毒性、酸化等 8 种环境影响指标上进行环境影响计算。结果表明: (1) 磷酸铁锂电池在 7 种指标上最优, 其中, 全球变暖为 2.70×10^{-1} kg CO₂ eq、人体毒性为 1.43×10^{-1} kg 1,4-DB eq、酸化为 1.24×10^{-3} kg SO₂ eq; 环境影响潜势从低到高分别为: 磷酸铁锂、二次利用磷酸铁锂、三元锂、二次利用三元锂和铅蓄电池。(2) 电池充放电效率的提高对于降低温室气体排放尤为关键, 敏感性超过 367%; 而电池循环次数和规范回收率的作用相对有限, 敏感性低于 25%。(3) 在 2025、2035 和 2050 年的电力结构下, 5 种电池都能减少 31%、52% 和 72% 以上的温室气体排放。综上, 为促进储能行业的低碳化可持续发展, 建议优先发展磷酸铁锂电池, 加大对电池充放电效率提升的研发投入, 推动电力结构的清洁化转型。

关键词 生命周期评价; 储能电池; 二次利用; 锂电池; 铅蓄电池; 环境影响

随着可再生能源的迅猛发展, 储能电池行业也显著发展, 到 2023 年储能电池装机容量高达 21 GW^[1]。目前, 磷酸铁锂 (LFP)、三元锂 (NCM) 和铅蓄电池 (LAB) 因占据储能电池 97% 的市场份额成为当前研究热点^[2]。二次利用磷酸铁锂 (SULFP) 和二次利用三元锂 (SUNCM) 电池随新能源汽车的发展而逐渐兴起^[3], 因其可以有效延长产品使用寿命, 减少对新电池的需求^[4], 缓解中国在锂、镍、钴等金属资源方面的短缺问题, 展现出巨大的潜力^[5]。然而, 储能电池本质上是能源密集型产品, 在生产、使用和回收过程亦伴随着环境污染^[6], 但其推广与发展过程对环境影响的考虑相对不足^[7]。且不同储能电池在生产、回收方式以及使用过程中性能的差异, 导致其环境影响各异, 增加了选择环保电池的难度^[8]。鉴于储能电池的发展目标之一是减少环境污染^[9], 因此明确不同储能电池的环境影响对于储能行业的可持续发展至关重要。

以往多位学者使用生命周期评价 (LCA) 方法对具体产品的环境影响开展研究^[10-12], 该方法是评估产品“从摇篮到坟墓”环境影响的有效工具^[13]。在储能电池领域, 有学者聚焦于新锂电池与 LAB 之间的环境影响对比, 例如 YUDHISTIRA 等^[14]在评估锂电池和 LAB 作为备用电源的环境影响时, 发现新锂电池在大部分环境指标上更优。然而, FAN 等^[15]基于家庭储能领域的研究显示, LAB 在多数环境影响指标上优于锂电池。有学者针对不同类型的锂电池进行评估。JASPER 等^[8]在家庭储能领域的对比研究显示, LFP 在环境影响方面要优于 NCM 电池。然而 LE VARLET 等^[16]的研究揭示了不同结果, 在对比多种家庭储能锂电池的环境影响时, 发现 LFP 电池的排放略高于 NCM 电池。这也在 CHEN 等^[7]基于全球产量计算电池平均碳足迹的研究中得到了验证。随着二次利用电池的兴起, 学者们开始关注其环境影响, RICH 等^[17]和 YANG 等^[18]对比了二次利用锂电池与 LAB 的环境影响, 结果表明二次利用锂电池具有更高的环境效益。

收稿日期: 2024-04-12; 录用日期: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52270181, 52060017); 江西省科技厅, 重点研发计划-重点项目 (20232BBG70005); 江西省研究生创新专项资金项目 (YC2023-S122)

第一作者: 田西 (1987—), 男, 博士, 教授, tianxi@ncu.edu.cn ✉通信作者

然而, 现有研究缺少多类典型储能电池环境影响的对比研究, 其功能单元和核算边界各异, 难以相互对比, 且未充分考虑中国储能电池产业规范回收率的实际情况。因此, 本研究选取锂电池 (LFP、NCM)、二次利用锂电池 (SULFP、SUNCM) 和 LAB 为研究对象, 建立了 5 种典型储能电池详细的生命周期清单。并基于中国实际回收情况, 运用 LCA 方法, 以 1 kWh 能量传递为功能单元, 全面评估了中国 5 种典型储能电池的平均环境影响, 识别了影响电池环境效益的热点阶段。同时, 探讨了环境影响分配方法、电池循环次数、充放电效率以及规范回收率的重要性。最后, 结合未来电力结构评估了储能电池的减排潜力, 以期对储能电池行业低碳化发展提供数据支持和决策参考。

1 材料与方法

根据 ISO14040 系列标准, LCA 方法分 4 个步骤: 目标和范围确定、清单分析、影响评价和结果解释^[19]。

1.1 目标与范围定义

1) 评价目标。评价目标包括: (1) 建立 LFP、NCM、SULFP、SUNCM 和 LAB 的全生命周期清单, 对比中国 5 种储能电池的平均环境影响; (2) 明确储能电池的热点生命周期阶段; (3) 评估不同回收方法、电池循环次数、充放电效率和规范回收率的重要性; (4) 明确未来电力结构下储能电池的减排潜力。

2) 评价范围。评价范围包括功能单元和系统边界。以往研究使用 1 kWh 电池容量作为功能单元^[4,7,10,15], 没有考虑电池循环寿命, 无法反映储能电池功能效果, 容易造成评价结果不准确。储能电池的核心功能是作为能量传递媒介^[14]。因此, 本研究综合考虑电池容量和循环次数, 将功能单元定义为电池组生命周期内 1 kWh 能量传递。系统边界涵盖 5 种储能电池从“摇篮到坟墓”的环境影响, 如图 1 所示, 包括电池的生产、使用和回收过程。由于不同生产工厂之间的运输和基础设施存在显著差异, 这些因素并未被考虑。

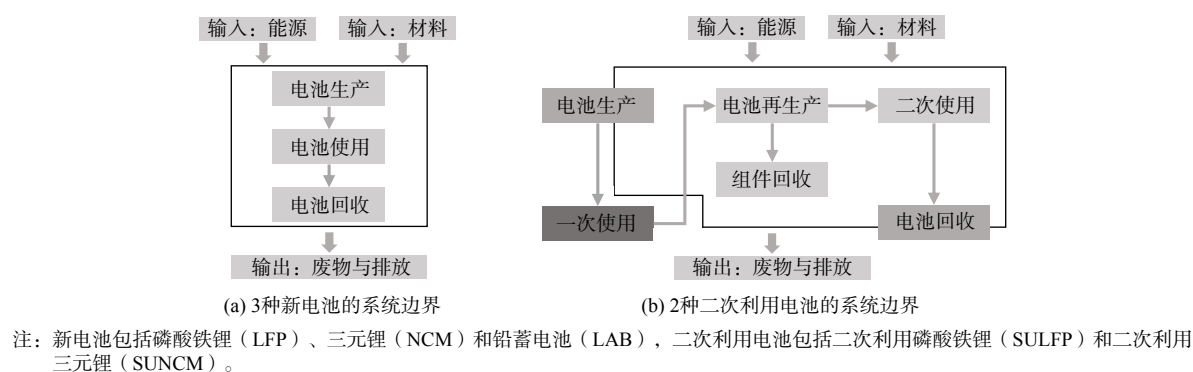


图1 5种典型储能电池的系统边界

Fig. 1 System boundary of five typical energy storage batteries

1.2 清单分析

1) 电池生产阶段。新电池的生产阶段包括原材料获取和电池组装 2 个过程。锂电池包主要包括正极材料、负极材料、电解液、隔膜、外壳、电池管理系统等几个部分。其中, LFP 电池的正极材料主要由磷酸铁锂、铝箔、粘结剂等材料制成。NCM 电池的正极材料主要由镍钴锰酸锂化合物、铝箔、粘结剂等材料制成。锂电池的负极材料主要为石墨与铜箔。相比之下, 铅蓄电池结构较为简单, 由铅、铅合金、硫酸溶液以及电控系统组成。对于二次利用电池, 无需生产电芯, 仅需拆解退役动力电池、回收拆卸的组件并换上新组件。因此, 二次利用电池的再生产阶段包括组件制造、电池组装和组件回收 3 个过程。5 种储能电池及其材料生产过程的生命周期清单数据见支撑文件表 1~10。

2) 电池使用阶段。电池使用阶段是电池在储能系统中的应用。该阶段的环境影响源自电池充放电过程的电力损失。电池充放电过程受多种因素影响, 包括电池寿命、充放电效率等。通常, 电池寿命与循环次数紧密相关, 循环次数增加会导致可用容量减少, 直至电池无法使用^[20]。因此, 本研究使用循环次数作为电池寿命的衡量标准。为简化计算, 采用前人研究得出的公式来估算锂电池的容量损失^[21], 公式如式 (1) 所示。

$$\xi = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \cdot n^z \quad (1)$$

式中： ξ 为电池相对容量损耗，%； A 为常数； E_a 为活化能， $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ； R 为气体常数， $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ； T 为温度， K ； n 为循环次数； z 为幂律系数。LFP 电池采用 HAN 等^[21]的模型参数： A 、 $-E_a/R$ 、 T 和 z 的值分别为 0.182 5、1 324.65、298.15 和 0.587 8。NCM 电池采用 LI 等^[22]的模型参数： $A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}}$ 和 z 的值分别为 0.003 62 和 0.588。

锂电池使用阶段的电能输入量、输出量和损耗量计算公式如式 (2)、(3)、(4) 所示。

$$E_{\text{In}} = \sum_{i=1}^n (1 - \xi_i) \cdot E_l \cdot \text{DoD} \cdot \alpha^{-1} \quad (2)$$

$$E_{\text{Out}} = \sum_{i=1}^n (1 - \xi_i) \cdot E_l \cdot \text{DoD} \cdot \alpha \quad (3)$$

$$E_{\text{Loss}} = E_{\text{In}} - E_{\text{Out}} = \sum_{i=1}^n (1 - \xi_i) \cdot E_l \cdot \text{DoD} \cdot \frac{1 - \alpha^2}{\alpha} \quad (4)$$

式中： E_{In} 为单位产品生命周期内输入总电能， kWh ； E_{Out} 为单位产品生命周期内输出总电能， kWh ； E_{Loss} 为单位产品生命周期内损失总电能， kWh ； E_l 为单位储能电池的初始标称容量， kWh ； DoD 为储能电池放电深度； α 为储能电池充放电效率。

LAB 生命周期内损失总电能的计算公式如式 (5) 所示。

$$E_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot E_l \cdot \text{DoD} \cdot \frac{1 - \alpha^2}{\alpha} \quad (5)$$

式中： ω_i 为每个循环开始时电池剩余容量的百分比。LAB 退化的过程是复杂的非线性过程。为简化计算，假设其容量在使用阶段呈线性递减。目前 LAB 的循环次数一般在 500~1 200 次之间^[23]，取值 850 次。

假设所有储能电池的放电深度为 80%，锂电池和二次利用锂电池和的充放电效率分别为 90% 和 88%，LAB 的充放电效率在 75%~80% 之间^[24]，取值 77.5%。5 种储能电池的详细参数如表 1 所示。

表 1 5 种典型储能电池性能参数

Table 1 Performance parameters of five typical energy storage batteries

电池参数	单位	磷酸铁锂 (LFP)	三元锂 (NCM)	二次利用磷酸铁锂 (SULFP)	二次利用三元锂 (SUNCM)	铅蓄电池 (LAB)
初始容量	%	100	100	80	80	100
退役容量	%	60	60	60	60	60
电池容量	kWh	1	1	1	1	1
电芯能量密度	$\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$	167.4	224.2	149.9	214.2	—
电池包能量密度	$\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$	145.7	204.3	120.7	166.7	40
电池放电深度	%	80	80	80	80	80
电池充放电效率	%	90	90	88	88	77.5

3) 电池回收阶段。根据中国电池回收的实际情况，LFP、NCM 电池主要使用湿法冶金回收工艺进行回收。LFP 电池湿法冶金回收工艺主要包括电池预处理(破碎与分选)，酸浸、过滤、除杂、沉磷酸铁、粉末蒸馏、锂溶液净化、沉锂等过程。回收产品主要包括碳酸锂、磷酸铁、有色金属、塑料等。NCM 电池湿法冶金回收工艺主要包括电池预处理、焙烧及酸浸、除杂、提纯、浸出、萃取等过程。回收产品主要包括碳酸锂、硫酸镍、硫酸钴、硫酸锰、有色金属、塑料等。铅蓄电池主要使用火法冶金回收工艺进行回收，该工艺主要包括电池预处理、冶炼含铅材料、酸性气体回收等过程，回收产品主要包括铅、硫酸、塑料等。假设电池使用前后的重量不变。

1.3 生命周期评价

产品单位产值环境影响 (levelized environmental impact of energy, LEIOE) 可以通过单位产品全生命周期平均环境影响除以单位产品全生命周期内输出总电能来计算, 计算公式如式 (6)、(7) 所示。

$$LEIOE = \frac{EI_{Unit}}{E_{Out}} \quad (6)$$

$$EI_{Unit} = EI_{pro} + EI_{use} + [\rho \cdot EI_{rec} + (1 - \rho) \cdot EI_{dis}] \quad (7)$$

式中: EI_{Unit} 为单位产品全生命周期平均环境影响, 选取 1 kWh 标称容量电池作为单位产品; EI_{pro} 为单位产品生产阶段环境影响; EI_{use} 为单位产品使用阶段环境影响; ρ 为电池规范回收率; EI_{rec} 为单位产品回收过程环境影响; EI_{dis} 为单位产品处置过程环境影响, 其中, 锂电池作为一般城市固体废物进行处置, 铅蓄电池作为危险废物进行处置。锂电池规范回收率为 20%^[25], 铅蓄电池规范回收率为 90%^[26]。

数据来源于环评报告、论文文献的开源数据和 Ecoinvent 3.8 内置数据库。使用 CML-IA baseline 方法评估 5 种电池全生命周期环境影响。评估的环境影响类别包括 8 种, 如表 2 所示。

表 2 8 种环境影响评价指标

Table 2 Eight environmental impact assessment indicators

环境影响评价指标	英文名称	单位	缩写
非生物资源消耗	Abiotic depletion potential	kg Sb eq	ADP
非生物资源消耗-化石燃料	Abiotic depletion potential-fossil fuels	MJ	ADP-ff
全球变暖	Global warming potential (GWP100 a)	kg CO ₂ eq	GWP
人体毒性	Human toxicity	kg 1,4-DB eq	HT
酸化	Acidification potential	kg SO ₂ eq	AP
富营养化	Eutrophication potential	kg PO ₄ eq	EP
臭氧层消耗	Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	ODP
光化学氧化	Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq	PO

1.4 影响因素敏感性分析

1) 环境影响分配方法。考虑到电池生命周期的多功能性, 包括一次利用和二次利用。因此, 基于经济分配方法分配一次电池和二次电池之间的环境影响, 并与物理特性、50/50 和截止分配方法进行对比分析: ①经济分配方法, 基于一次和二次产品的经济价值进行分配, 通过二次产品价格除以一次产品价格计算分配系数。目前, 二次电池价格约为新电池的 33%^[18], 即分配系数为 33%。②物理特性分配方法, 以产品的服务权重来分配。储能电池的核心功能是供能, 因此分配系数由二次利用过程供能总量除以一次利用和二次利用过程供能总量之和来计算。基于电池使用阶段的公式计算出分配系数为 59%。③50/50 分配方法, 假设当产品二次利用普遍时, 产品生产和回收阶段的环境影响应均匀分配给产品的一次和二次利用阶段, 即分配系数为 50%。④截止分配方法, 没有特定的分配系数, 以二次利用电池再生产过程为节点, 对电池多生命周期系统进行划分。电池生产阶段的所有环境影响归属于一次产品, 即分配系数为 0; 同时电池回收阶段的所有环境影响归属于二次产品, 即分配系数为 1。

2) 其它影响因素。其它影响因素包括电池循环次数、充放电效率和规范回收率 3 种。其中, 电池循环次数能对电池使用阶段用电量产生显著影响; 电池充放电效率能影响电池使用阶段的电量损失量和输出量; 电池规范回收率能影响电池回收阶段的平均环境影响。因此, 对这 3 种影响因素进行敏感性分析。

1.5 未来电力结构

无论是新锂电池、二次利用锂电池还是 LAB, 在其生产、使用和回收过程中都使用了电力。而清洁电能如太阳能、风能等可以显著减少电力环境影响。当前中国一直在推动新能源的发展, 电力结构也在逐步清洁化, 有助于降低电池全生命周期环境影响。因此, 基于《中国“十四五”电力发展规划研究》报告对未来电力结构进行设置^[27], 并评估其对储能电池碳排放的影响。

2 结果与讨论

2.1 储能电池环境影响结果

1) 储能电池环境影响结果对比。基于经济基础分配方法的5种储能电池LCA结果如表3和图2所示。LFP电池在环境影响方面表现最佳，而LAB的环境影响最大。具体而言，LFP电池仅在HT指标上略高于SULFP电池，在别的指标上都优于其它电池，能够降低3%以上的环境影响。SULFP电池环境效益第二，仅在GWP指标上高于NCM电池5%，但在其它7个指标上都低1%~61%。此外，SULFP电池在所有指标上都优于SUNCM和LAB。NCM和SUNCM电池各有优劣。NCM电池在ADP、HT和ODP指标上高于SUNCM电池4%~15%，但在其他5个指标上低3%~15%。综合来看，环境影响潜势从低到高分别为：LFP、SULFP、NCM、SUNCM和LAB。这表明仅考虑环境影响时，LFP电池更值得发展。

表3 5种典型储能电池8种环境影响指标结果

Table 3 Results of eight environmental impact indicators for five typical energy storage batteries

影响类别	单位	LFP	NCM	SULFP	SUNCM	LAB
ADP	kg Sb eq	4.37×10^{-6}	1.16×10^{-5}	4.50×10^{-6}	1.11×10^{-5}	3.06×10^{-5}
ADP-ff	MJ	2.53	3.03	3.01	3.44	7.70
GWP	kg CO ₂ eq	2.78×10^{-1}	3.16×10^{-1}	3.33×10^{-1}	3.69×10^{-1}	8.21×10^{-1}
HT	kg 1,4-DB eq	2.37×10^{-1}	4.48×10^{-1}	2.24×10^{-1}	3.87×10^{-1}	5.35×10^{-1}
AP	kg SO ₂ eq	1.39×10^{-3}	1.82×10^{-3}	1.56×10^{-3}	1.88×10^{-3}	4.00×10^{-3}
×10P	kg PO ₄ eq	3.21×10^{-4}	4.25×10^{-4}	3.79×10^{-4}	4.80×10^{-4}	8.88×10^{-4}
ODP	kg CFC-11 eq	2.50×10^{-9}	6.80×10^{-9}	2.90×10^{-9}	6.11×10^{-9}	8.04×10^{-9}
PO	kg C ₂ H ₄ eq	5.38×10^{-5}	7.21×10^{-5}	6.09×10^{-5}	7.50×10^{-5}	1.56×10^{-4}

得益于更高的电池循环次数和充放电效率，LFP电池在生命周期内能够输出更多的电能，使其环境影响最低。SULFP和NCM电池两者输出电能较为接近，因此两者的环境影响也较为接近。但由于NCM电池生产过程使用了大量的稀有金属，使其在ADP、HT和ODP指标上远远高于SULFP电池。SUNCM和LAB由于较低的循环次数和充放电效率，环境影响都很高。综合来看，二次利用电池虽然在缓解资源短缺问题方面具有潜力，但受到低电池循环次数和低充放电效率的显著影响，环境效益有待进一步的提升。

LFP的环境效益明显优于NCM电池，且SULFP也优于SUNCM电池。此外，中国在镍、钴、锰3种关键金属资源上极度稀缺^[4]，镍矿、钴矿和锰矿依赖对外依赖度分别超过70%、80%和90%^[28-30]。这并不利于中国大规模生产NCM电池。因此，LFP比NCM电池更适合扩大生产，不仅能降低中国稀缺金属的对外依赖度，还能提高二次利用电池中LFP的比例，降低二次利用锂电池的环境影响。

此外，本研究的结果与其它研究存在一定差异。其中，FAN等^[15]和LE VARLET等^[16]与本研究不一致的原因分别为功能单元和核算边界的不一致。JASPER等^[8]和YUDHISTIRA等^[14]在研究中未考虑不同电池充放电效率的差异，假定所有电池充放电效率相同，导致低估了铅蓄电池与二次利用电池的环境影响。这进一步凸显了统一功能单元与核算边界的必要性。同时，也强调了电池充放电效率在环境影响评估中的重要性，下文将针对这一因素进行深入研究。

2) 生命周期阶段贡献分析。图3揭示了5种储能电池各个生命周期阶段的环境影响。图中正值表示环境负担，负值表示环境影响降低。其中，生产阶段(包括生产和再生产)在ADP、HT和ODP指标上的贡献显著，占比44%~235%。由于铜箔、铜和电池管理系统的使用，锂电池生产阶段在ADP和HT指标上贡献较

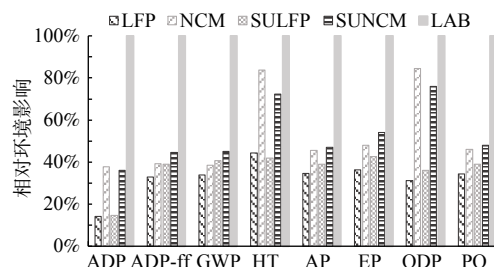


图2 5种典型储能电池8种环境影响指标对比图

Fig. 2 Comparison of eight environmental impact indicators for five typical energy storage batteries

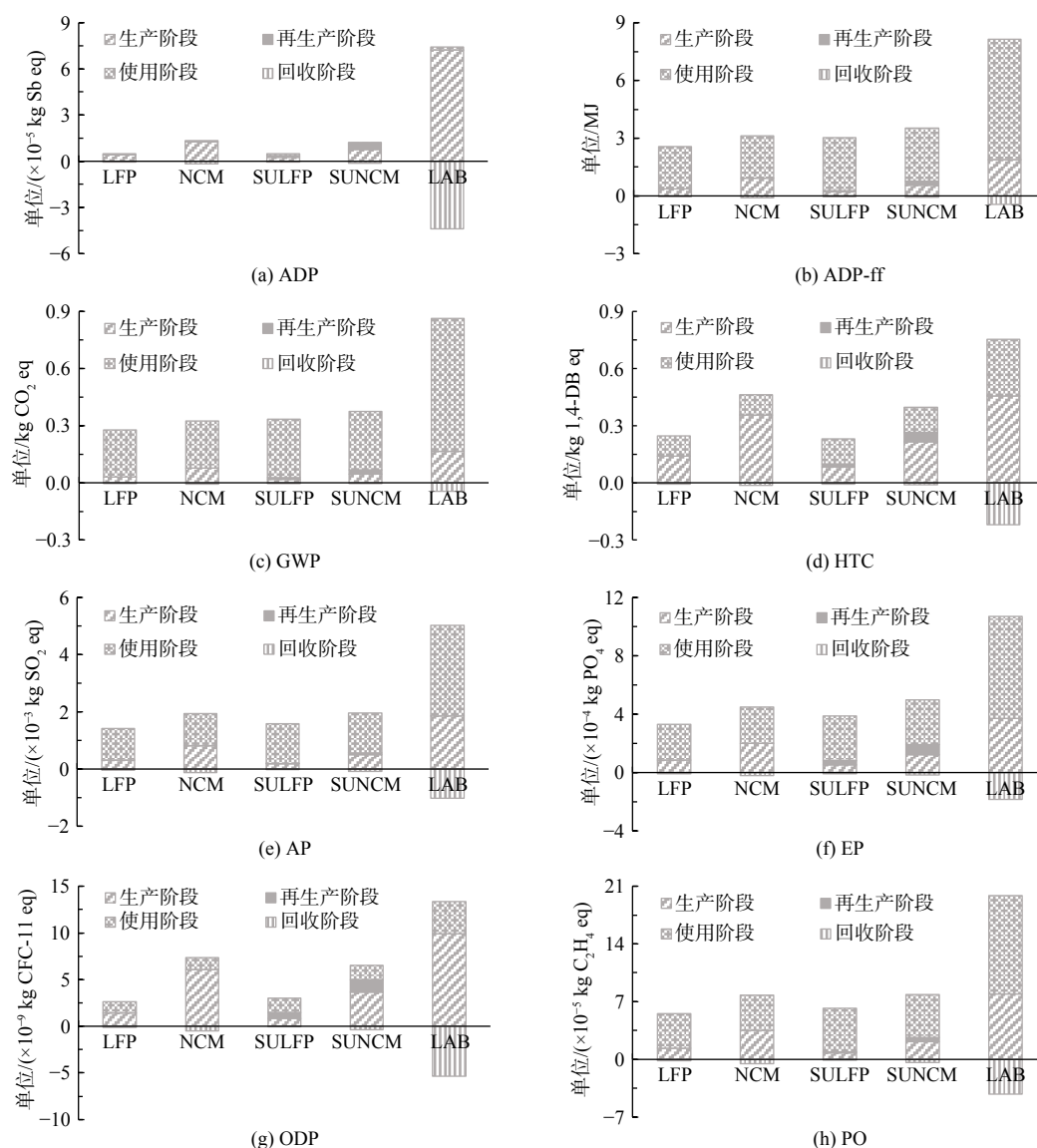


图3 5种典型储能电池生命周期阶段贡献图

Fig. 3 Life cycle stages contribution for five typical energy storage batteries

高。这些材料的生产过程不仅消耗大量化石燃料、水资源和矿产资源,还会释放对人体有害的重金属、粉尘和颗粒物。铅蓄电池则归因于铅和铜的消耗。影响 ODP 指标的因素较多,包括碳酸锂、石墨、电解液、天然气以及电池管理系统等,但 5 种电池的 ODP 指标数值都较低,对臭氧层的破坏潜能极小。

使用阶段在 ADP-ff、GWP、AP、EP 和 PO, 5 个指标上贡献突出,占比 58%~92%,在 HT 和 ODP, 2 个指标上也能贡献 18%~58%。这归因于电力生产过程化石燃料的使用。电力生产过程,尤其是依赖化石燃料(如煤炭、天然气和石油)的发电方式,不仅消耗有限的非生物资源,还会释放大量的温室气体和其它污染物,同时会导致水体富营养化。此外,电池的高循环次数和低充放电效率也是重要的影响因素,两者使得电池使用阶段输出和损失的电能更多,导致使用阶段在多数指标上成为主要贡献阶段。

回收阶段能够降低电池的环境影响,但由于需要使用大量的电力和天然气,在 ADP-ff 和 GWP 指标上较低,环境影响仅降低 0.2%~5.7%。得益于铜、铝等金属以及正极材料的回收,在其它指标上都能降低 1.8%~143.1%,远超 ADP-ff 和 GWP 指标。此外,铅蓄电池的回收效益远高于锂电池,归因于铅蓄电池更成熟的回收产业链和更高的规范回收率。与之相比,锂电池的规范回收率仅有铅蓄电池的 22%,回收产业链还有待完善。总体而言,使用阶段的环境影响较大,而回收阶段表现良好,但在能源使用方面有待加强。

2.2 影响因素敏感性分析

1) 环境影响分配方法。以经济基础分配方法的电池环境影响作为基准，分配方法的敏感性分析结果如图4所示。结果表明分配方法的选择对环境影响有显著影响，尤其是在ADP、HT和ODP影响类别上。其中，在截止分配方法下二次利用产品的环境影响最低。与经济基础分配方法相比，截止分配方法在ADP、HT和ODP指标上减少了35%~91%，在其他指标上也能减少6%以上。这归因于电池生产和回收阶段在ADP、HT和ODP指标上的贡献较为显著。而截止法将电池生产阶段的环境影响全部归于一产品，同时将回收阶段的环境效益全部归于二次产品，使二次利用电池的环境影响低于新锂电池。因此，截止分配方法有利于促进二次产品的推广与发展。

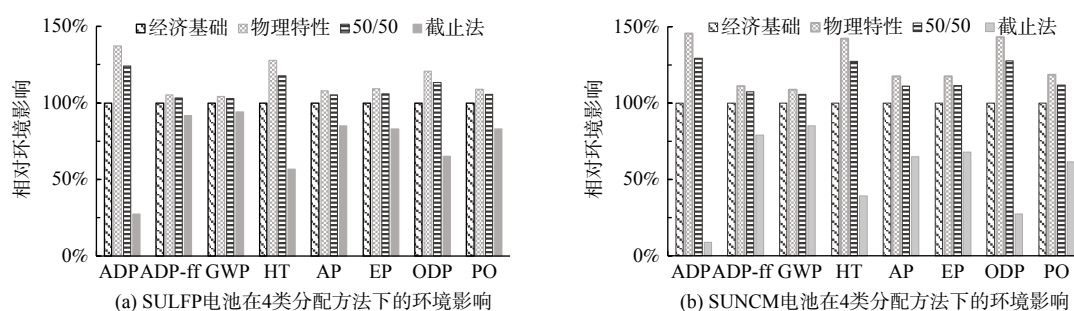


图4 2种二次利用电池基于4类环境影响分配方法的评价结果

Fig. 4 Evaluation results of two secondary use batteries based on four environmental impact allocation methods

与之相反，当采用50/50分配法的时候，二次利用锂电池的环境影响将全面高于新锂电池。这种分配方法更适用于已经普遍实施二次利用的产品。然而，当前二次利用锂电池市场尚处于新兴阶段，使用50/50分配方法会放大二次利用电池的环境影响，进而对其广泛采用构成挑战，显得不够公允^[18]。因此，在评估产品环境影响时，需要审慎地考虑市场的实际情况和发展阶段，以确保评价结果的准确性和公正性。

此外，由于电池在一次利用过程的输出电量低于二次利用过程，物理特性分配法的分配系数比50/50分配法还要高。然而，一次利用过程多是在电动车中使用，对电池的性能要求较高，导致使用过程容量衰退的更快，输出电能更低。因此，仅凭一次利用与二次利用过程的输出电能来分配环境影响是有失公平的。未来需要建立一套衡量标准，量化分析一次和二次使用过程输出电能的价值来优化分配比例。

2) 其他因素分析。电池循环次数、充放电效率和规范化回收率的敏感性分析结果如图5所示。结果显示，电池循环次数敏感性相对较低，仅有6.72%~24.79%，且在随着循环次数的上升而逐步降低。具体而言，即使循环寿命变动10%，环境影响也仅变动0.34%~1.25%。相较于电池循环次数，电池充放电效率的敏感性更高，并且随着充放电效率的提升，敏感性还在增强。每提高5%的充放电效率，环境影响便能降低

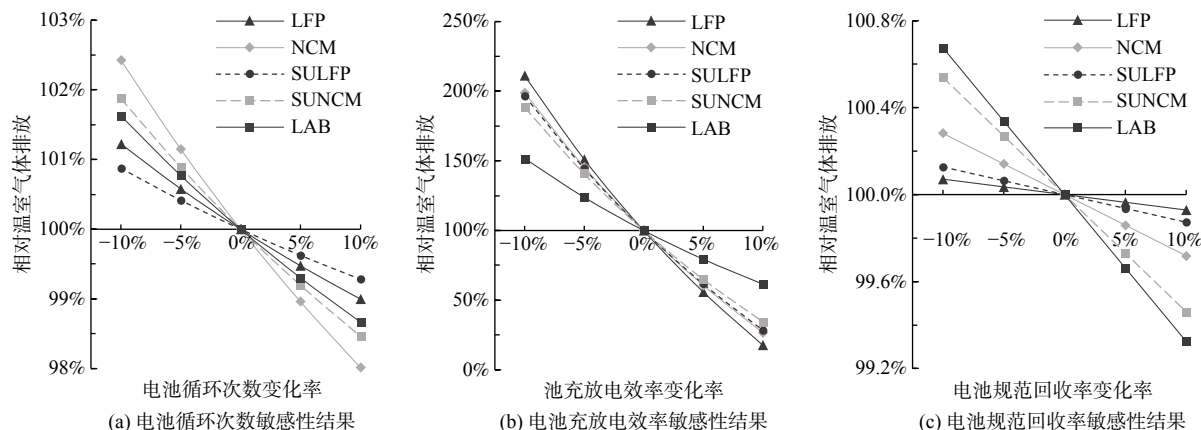


图5 5种典型储能关键影响因素的敏感性分析结果

Fig. 5 Sensitivity analysis results for five typical energy storage battery key influences

18%~71%，敏感性高达 367%~1 373%。电池规范回收率的敏感性最低，每提高 5% 的电池规范回收率，环境影响仅降低 0.03%~0.27%，敏感性仅有 0.63%~5.45%。

由于使用阶段的单位环境影响不受循环次数的影响，循环次数的变动仅能影响生产和回收阶段的单位环境影响。但使用阶段是 GWP 指标的主要贡献阶段，占比超过 78%，因此循环次数的敏感性较低。而充放电效率的提升不仅能减少使用阶段的电能损失，直接降低使用阶段的 GWP 指标值，还能增加电池生命周期内的输出电能，从而降低生产和回收过程的单位环境影响。因此，电池充放电效率的提高能显著影响电池全生命周期环境影响。电池规范回收率的变化仅能影响回收过程的温室气体排放，因此对于总体结果的敏感度最低。综上所述，提升充放电效率是降低电池环境影响的有效措施。

2.3 储能电池未来减排潜力

基于 2021、2025、2035 和 2050 年电力结构的环境影响结果如图 6 所示。结果表明，随着电力结构的日益清洁化，电池的环境影响也在稳步降低。与 2021 年相比，2025、2035 和 2050 年的电力结构分别使 5 种储能电池的温室气体排放降低了 31%~34%、52%~57% 和 72%~79%。值得注意的是，这 5 种储能电池环境影响的下降幅度略低于电力影响因子的下降幅度，但基本保持一致。这归因于电池使用阶段的温室气体排放与影响因子成比例系数为 1 的正比下降，同时生产和回收阶段也成正比下降，尽管其比例系数小于 1。由于使用阶段是影响电池 GWP 指标的主要阶段，使得降低电力影响因子能够大幅减少电池的环境影响。因此，电力结构的清洁化对改善电池全生命周期环境影响至关重要。

此外，有些研究表明二次利用电池的环境影响低于新电池^[11-12]，这与本研究结论相悖。这归因于研究场景的差异，那些研究基于光伏与储能系统结合的场景，而本研究聚焦于使用阶段电力来源于国家电网的情况。在光伏与储能系统结合的场景中，使用阶段完全依赖清洁能源，因此使用阶段排放为 0，电池的环境影响仅源于生产和回收阶段。本研究在仅考虑这 2 个阶段时，同样显示二次利用电池的环境影响是低于新电池的。因此，结论实质上是一致的。总体而言，光伏等清洁能源系统与储能系统的联合使用可以将电池使用阶段的排放降为 0，从而降低储能电池 78%~92% 的温室气体排放，是推动储能系统低碳化发展的有效措施。

3 结论

1) 基于 CML-IA baseline 方法综合考虑 5 种储能电池造成的 8 种环境影响，环境影响潜势越低表示对环境造成影响越小，环境影响潜势从低到高分别为：LFP、SULFP、NCM、SUNCM 和 LAB。使用阶段的贡献最高，在 ADP-ff、GWP、AP、EP 和 PO 指标上贡献 58%~92%，在 HT 和 ODP 指标上也能贡献 18%~58%。

2) 截止分配方法与经济基础分配法相比，能降低二次利用电池 6%~91% 的环境影响，更加利于二次利用电池的推广与发展。电池充放电效率的提高对于降低储能电池温室气体排放尤为关键，敏感性高达 367%，而电池循环次数和规范回收率的作用相对有限，敏感性低于 25%。

3) 在 2025、2035 和 2050 年的电力结构下，5 种电池都能降低 31%、52% 和 72% 以上的温室气体排放，表明推动电力结构的清洁化转型对于降低储能电池的环境影响至关重要。此外，将储能系统结合光伏等清洁能源系统使用也是关键减排路径，能够降低电池全生命周期 78% 以上的温室气体排放。

4) 为促进储能电池行业的低碳化可持续发展，建议优先发展 LFP 电池，加大提升电池充放电效率的研发投入。此外，推动电力结构的清洁化转型，以及结合光伏等清洁能源系统使用，也是降低储能电池环境影响的关键路径。

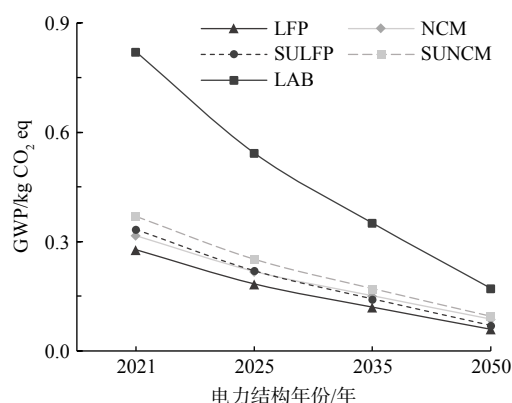


图 6 未来电力结构下 5 种典型储能电池的全生命周期温室气体排放

Fig. 6 Greenhouse gas emissions during full life cycle of five typical energy storage batteries in future electricity mix

参考文献

- [1] CNESA. CNESA 重磅发布：2023 上半年储能数据一览，产量与项目规模齐升[EB/OL]. (2023-08)[2024-01-11]. http://www.cnesa.org/information/detail/?column_id=1&id=5693.
- [2] 诸海滨. 新型储能百花齐放正当时，北交所电池及系统集成有优势[EB/OL]. (2023-07)[2024-03-22]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202307251592613973_1.pdf?1690291444000.pdf.
- [3] 赵光金, 李博文, 胡玉霞, 等. 退役动力电池梯次利用技术及工程应用概述[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2319-2332.
- [4] 吴奔奔, 余海军, 谢英豪, 等. 基于退役量预测下动力电池梯次与循环利用碳足迹分析[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 807-811+818.
- [5] 赖志颖, 赖文斌, 林楚园, 等. 退役动力电池回收利用的现状与碳核算研究进展[J]. 过程工程学报, 2023: 1-12.
- [6] 张川, 田雨鑫, 崔梦雨. 电动汽车动力电池制造商混合渠道回收模式选择与碳减排决策[J]. 中国管理科学, 2024, 32(6): 184-195.
- [7] CHEN W H, HSIEH I Y L. Techno-economic analysis of lithium-ion battery price reduction considering carbon footprint based on life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 425: 139045.
- [8] JASPER F B, SPÄTHE J, BAUMANN M, et al. Life cycle assessment (LCA) of a battery home storage system based on primary data[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 366: 132899.
- [9] HAN X, LI Y, NIE L, et al. Comparative life cycle greenhouse gas emissions assessment of battery energy storage technologies for grid applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 392: 136251.
- [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.
- [11] KAMATH D, ARSENAULT R, KIM H C, et al. Economic and environmental feasibility of second-life lithium-ion batteries as fast-charging energy storage[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(11): 6878-6887.
- [12] KAMATH D, SHUKLA S, ARSENAULT R, et al. Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications[J]. Waste Management, 2020, 113: 497-507.
- [13] 刘博, 岳波, 孟棒棒, 等. 基于全生命周期方法的麻城市密集型村镇生活垃圾处理模式评价[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 3005-3014.
- [14] 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.
- [15] FAN T, LIANG W, GUO W, et al. Life cycle assessment of electric vehicles' lithium-ion batteries reused for energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 71: 108126.
- [16] LE VARLET T, SCHMIDT O, GAMBHIR A, et al. Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery chemistries for residential storage[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: 101230.
- [17] 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.
- [18] YANG J, GU F, GUO J. Environmental feasibility of secondary use of electric vehicle lithium-ion batteries in communication base stations[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 156.
- [19] 张慧, 池涌, 王立贤, 等. 典型厨余垃圾处置利用技术的环境与烟生命周期评价[J]. 环境工程学报, 2022, 16(6): 2088-2098.
- [20] 赵伟, 袁锡莲, 周宜行, 等. 考虑运行寿命内经济性最优的梯次电池储能系统容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 16-24.
- [21] HAN X, OUYANG M, LU L, et al. A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation[J]. Journal of Power Sources, 2014, 268: 658-669.
- [22] LI X, KANG J, YANG Y, et al. A study on capacity and power fading characteristics of Li(Ni₁/3Co₁/3Mn₁/3)O₂-based lithium-ion batteries[J]. Ionics, 2016, 22(11): 2027-2036.
- [23] 鑫锂锂电. 从技术、成本、市场三方面来看，储能领域为什么磷酸铁锂电池将取代铅酸与三元电池[EB/OL]. (2020-07)[2024-03-04]. <http://www.icbattery.com/news/show-htm-itemid-36378.html>.
- [24] YANG J, WEIL M, GU F. Environmental-economic analysis of the secondary use of electric vehicle batteries in the load shifting of communication base stations: A case study in China[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105823.
- [25] TIAN X, PENG F, XIE J, et al. Agent-based modeling for an end-of-life power battery cross-regional recycling system and subregional policy analysis: A case study in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 441: 141054.
- [26] TIAN X, TAN H, XIE J, et al. Design and simulation of a cross-regional collaborative recycling system for secondary resources: A case of lead-acid batteries[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 348: 119181.
- [27] GEIDCO. 中国能源变革转型与“十四五”电力发展[EB/OL]. [2024-03-21]. <https://www.geidco.org.cn/html/qqnhyhlw/zt20200731/index.html>.
- [28] 孟星宇, 宗宇航, 张西华, 等. 中国镍资源物质流动与碳排放分析[J/OL]. 化工进展, 1-16. [2024-05-27]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1875>.
- [29] 韩见, 陈其慎, 杨雪松, 等. 钴资源现状及未来 5-10 年供需形势分析[J]. 中国地质, 2023, 50(3): 743-755.
- [30] WANG F, LONG G, MA K, et al. Recycling manganese-rich electrolytic residues: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2023, 21(4): 2251-2284.

(责任编辑: 金曙光)

Environmental impact assessment of five typical energy storage batteries based on full life cycle assessment

TIAN Xi^{1,2,3,*}, HU Zhikang³, MA Qingyuan³, PENG Fei³, WEI Guoen⁴, XU Ming⁵, PENG Aiping⁶

1. Research Center for Central China Economic and Social Development, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Engineering Research Center of Watershed Carbon Neutralization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 4. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 5. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 6. Ganfeng Lithium Group Co., LTD., Xinyu 336600, China

*Corresponding author, E-mail: tianxi@ncu.edu.cn

Abstract Currently, lithium-ion batteries and lead-acid batteries account for 97% of the energy storage battery market share. This study focused on comparing and analyzing the environmental impacts of five typical energy storage batteries using full life cycle assessment method. Considering the battery capacity and cycle numbers, 1 kWh energy delivered was defined as the functional unit. Based on the CML-IA baseline method, environmental impact was calculated on eight environmental impact indicators such as global warming, human toxicity and acidification. The findings indicated: (1) The lithium-iron phosphate battery outperforms other batteries in seven indexes, among which the environmental impact indexes were 2.78×10^{-1} kg CO₂ eq for global warming, 2.37×10^{-1} kg 1, 4-DB eq for human toxicity and 1.39×10^{-3} kg SO₂ eq for acidification. The environmental impacts potentials from low to high were as follows: lithium-iron phosphate, secondary use lithium-iron phosphate, lithium ternary, secondary use lithium ternary, and lead-acid battery. (2) Improving battery charging and discharging efficiency was crucial for reducing greenhouse gas emissions, with a sensitivity of more than 367%; while the number of battery cycles and formal recycling rate played a relatively limited role, with a sensitivity of less than 25%. (3) Under the electricity mix of 2025, 2035 and 2050, all five types of batteries could significantly reduce greenhouse gas emissions by more than 31%, 52% and 72%. In conclusion, in order to promote the low-carbon sustainable development of the energy storage industry, it was recommended to prioritize the development of lithium iron phosphate batteries, increase research and development investment in battery charge/discharge efficiencies, and promote the clean transformation of the electricity mix.

Keywords life cycle assessment (LCA); energy storage battery; secondary use; lithium-ion battery; lead-acid battery; environmental impact