

粤港澳大湾区电化学储能碳足迹白皮书

摘要

1. 前言

面对全球气候挑战及“双碳”目标要求，粤港澳大湾区（以下简称“大湾区”）依托政策与产业优势，积极发展电化学储能以推动能源低碳转型，该区域已成为我国储能产业集聚高地。其中，深圳作为产业核心区，2024年储能总产值突破3000亿元，锂电池出口约900亿元，有效支撑高比例可再生能源并网与系统灵活性提升。为科学评估电化学储能领域的碳排放贡献，需建立以全生命周期碳足迹（LCF）为核心的评价体系，系统核算从资源开采到回收再利用各环节的碳排放，识别热点与敏感因子，推动产品生态设计、供应链协同与政策制定。本白皮书“基于ISO和欧盟《新电池法》标准，针对磷酸铁锂电池（LFP）与镍钴锰三元电池（NCM）构建统一的碳足迹核算范式，量化回收再利用等环节的减排潜力，为大湾区电化学储能低碳发展提供量化依据与政策建议。

2. 电化学储能发展态势

在“双碳”目标驱动下，电化学储能成为新型储能发展重点，已成为全球主要经济体竞相布局的战略领域。在技术研究层面，国内技术研发通过国家科技计划持续推动，在超级电容器、锂离子电池、固态电池、钠离子电池等关键材料、系统集成及低成本技术方面取得显著进展。美、欧、日、韩等也纷纷布局，投入资金争夺技术主导权。在商业化应用层面，中国自“十二五”以来持续出台政策，推动储能从示范走向规模化应用。多国也通过专项计划加速其商业化与产业建设。

(1) 中国政策规划与产业政策

2024年，我国电化学储能持续快速发展，全年装机容量突破7000万千瓦。截至年底，全国新型储能装机达7376万千瓦、储能能力1.68亿千瓦时，分别为“十三五”末的20倍，较2023年增长超130%。平均储能时长提升至2.3小时，同比增加0.2小时。调度运行效率也显著提高，电网等效利用小时数约1000小时，有效促进新能源消纳，增强系统稳定性和供电能力，为新型电力系统建设提供了有力支撑。电化学储能装机规模排名前五的省份为内蒙古、新疆、山东、江苏和宁夏。另有十余省份装机超200万千瓦，详见图1。



(2) 电化学储能技术分类与应用现状

电化学储能技术近年来在能量密度、循环寿命和成本控制等方面持续突破，目前已形成锂离子电池、钠离子电池等多条技术路线并存的格局。其中，锂离子电池仍是当前商业化最成熟、体系最完备、综合性能最优的主导技术，预计在中短期内仍将维持其核心地位。

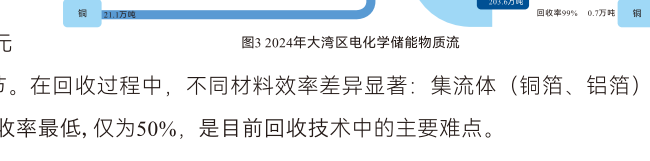
(3) 电化学储能技术分类与主要应用场景

近年来，电化学储能技术取得显著进展，研究聚焦于提升能量密度、延长循环寿命和降低综合成本等关键方向。目前，电化学储能技术，主要包括锂离子电池、钠离子电池、液流电池和超级电容器等技术路线，这些技术各具优势，在电力系统、可再生能源并网及电动汽车等不同应用场景中展现出强劲竞争力。

3. 大湾区电化学储能产业链发展现状

(1) 大湾区电化学储能生产能源结构

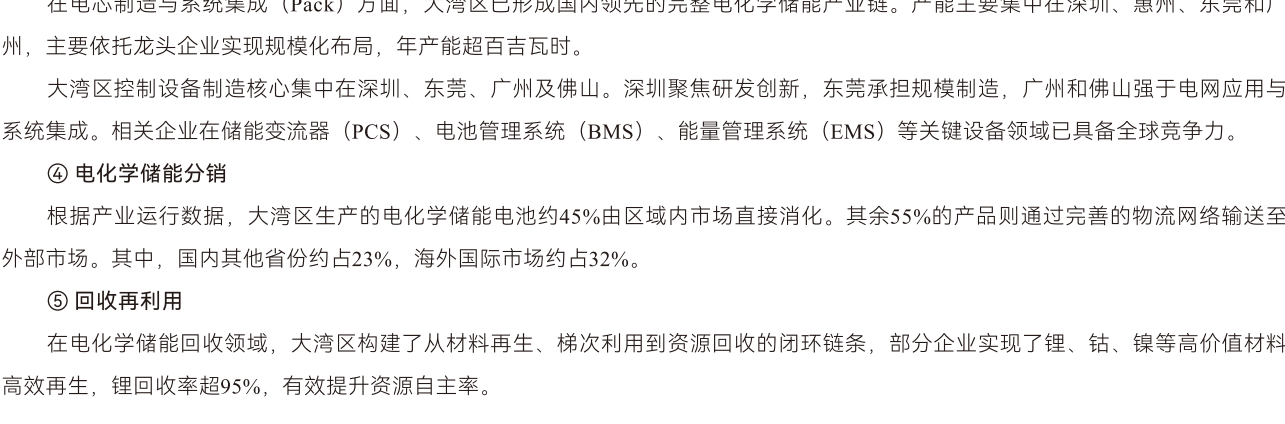
2024年，大湾区规模以上工业用电量约5416.25亿千瓦时，增长6.8%；电化学储能产业工业用电量约339.15亿千瓦时，占比6.26%，详见图2。



(2) 全生命周期视角下的大湾区储能产业现状

本报告所界定的“电化学储能”，其研究范畴特指锂离子电池技术。依据欧盟JRC（联合研究中心）发布的《电池与废电池法规（Regulation (EU) 2023/1542)》（俗称“欧盟《新电池法》”）工业电池碳足迹核算规则草案，本报告将锂离子电池的全生命周期系统边界划分为五个核心阶段：原材料制造、电化学储能材料生产、电化学储能系统制造（涵盖电芯、Pack及配套控制设备的生产）、电化学储能分销，以及寿命终止后的回收与再利用。

图3所示为2024年大湾区锂离子电池产业的物质流分析结果。数据表明，为生产约145.89吨锂离子电池，共消耗磷酸铁锂和三元正极材料超过50万吨。然而，全年仅75%的报废电池进入回收环节。在回收过程中，不同材料效率差异显著：集流体（铜箔、铝箔）回收率超99%，镍、钴、锰等关键金属回收率达98%，而氟元素回收率最低，仅为50%，是目前回收技术中的主要难点。



① 原材料制造
大湾区作为锂、钴、镍、石墨等电池材料的重要加工基地，其生产所需原材料高度依赖外部供应。锂资源主要进口自南美“锂三角”和澳大利亚，钴资源集中于刚果（金），镍矿主要通过阳江、深圳等港口输入。部分原料从国内如四川、江西（锂）、甘肃（镍）等地补充。

② 电化学储能材料加工
大湾区已形成涵盖正极材料、电解液、隔膜等关键环节的完整电化学储能材料产业链，在深圳、广州等重点城市集聚发展，并依托区域协同布局，构建了以珠江口为核心的储能电池产业集聚区，以及多个专业化材料制造基地。当地企业持续推动材料研发与性能突破，显著提升了电池技术水平。

③ 电化学储能电芯、Pack与控制设备
在电芯制造与系统集成（Pack）方面，大湾区已形成国内领先的完整电化学储能产业链。产能主要集中在深圳、惠州、东莞和广州，主要依托龙头企业实现规模化布局，年产能超百吉瓦时。大湾区控制设备制造核心集中在深圳、东莞、广州及佛山。深圳聚焦研发创新，东莞承担规模制造，广州和佛山强于电网应用与系统集成。相关企业在储能变流器（PCS）、电池管理系统（BMS）、能量管理系统（EMS）等关键设备领域已具备全球竞争力。

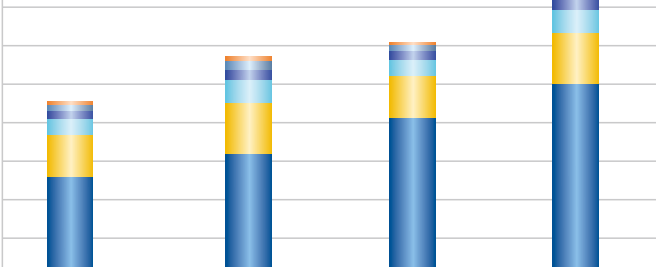
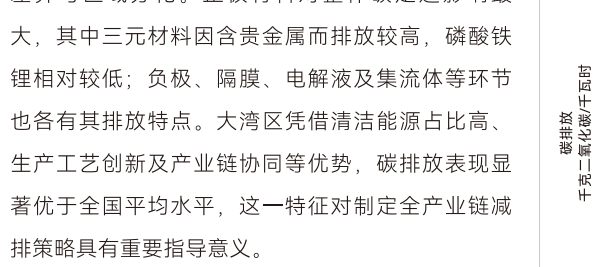
④ 电化学储能分销
根据产业运行数据，大湾区生产的电化学储能电池约45%由区域内市场直接消化，其余55%的产品则通过完善的物流网络输送至外部市场。其中，国内其他省份约占23%，海外国际市场约占32%。

⑤ 回收再利用
在电化学储能回收领域，大湾区构建了从材料再生、梯次利用到资源回收的闭环链条，部分企业实现了锂、钴、镍等高价值材料高效再生，锂回收率超95%，有效提升资源自主率。

(3) 大湾区电化学储能产业产值预测

大湾区作为中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一，正引领着国家能源转型和绿色发展的浪潮。为给众多投资者及创新者提供思路，报告基于2020—2024年电化学储能产业产值的显著增长趋势，对未来至2035年的产值进行预测。预计2028年大湾区电化学储能产值为2020年的一倍，2033年该产业产值将超过1万亿元。电化学储能产业正展现出空前巨大且持续的增长潜力，为投资者和创新者提供了广阔的舞台（详见图4）。

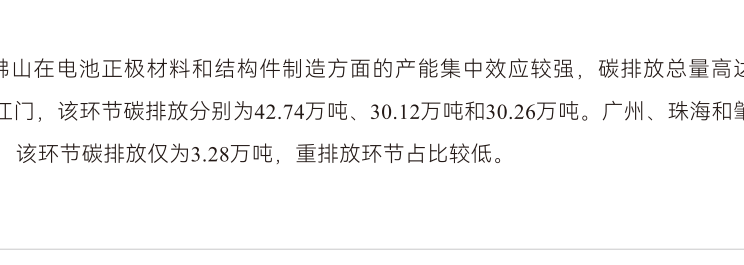
在电化学储能装机量快速增长的背景下，退役电池的规范化回收与溯源管理日益重要，预计至2035年，粤港澳大湾区年退役电池规模将攀升至95万吨，对规模化、环保化回收体系提出更高要求。



4. 大湾区电化学储能产业链各环节对碳足迹的贡献

(1) 原材料制造

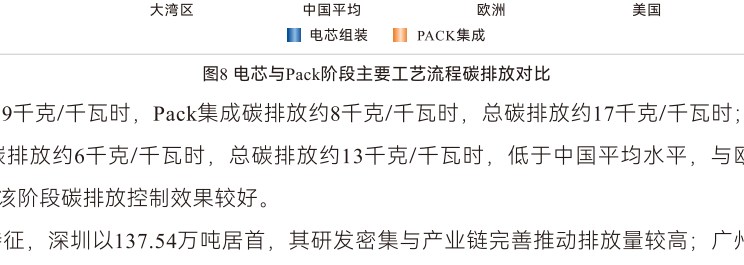
原材料制造作为电化学储能产业链的源头环节，其碳排放特征直接影响产业整个生命周期的环境足迹。本部分基于详实的行业调研数据，重点分析大湾区与全国平均水平的碳排放差异，揭示关键影响因素，为后续减排策略的制定提供科学依据。由图6可知，硫酸钴原材料制造时，大湾区碳排放约12.5千克，全国平均约20千克。整体而言，大湾区硫酸镍、铝箔等其他原材料制造阶段的碳排放普遍低于全国平均。



大湾区电池材料生产的碳排放呈现多维度特征：工艺上，盐湖提锂、湿法冶炼等技术显著优于高能耗提取方式；区域上，大湾区凭借清洁能源占比高、产业链集聚和运输距离短等优势，单位排放较全国平均水平低15%~20%；材料上，钴系产品碳强度最高，石墨最低。该地区产业链碳足迹中，94%以上为域外上游环节产生的“隐含碳”，区内精炼与回收直接排放不足6%。作为全球资源精加工与回收中心，大湾区需通过绿色供应链与国际合作，积极承担产业链减排责任。

(2) 电化学储能材料生产

电化学储能材料生产碳排放存在明显技术路线差异与区域分化。正极材料对整体碳足迹影响最大，其中三元材料因含贵金属而排放较高，磷酸铁锂相对较低；负极、隔膜、电解液及集流体等环节也各有其排放特点。大湾区凭借清洁能源占比高、生产工艺创新及产业链协同等优势，碳排放表现显著优于全国平均水平，这一特征对制定全产业链减排策略具有重要指导意义。

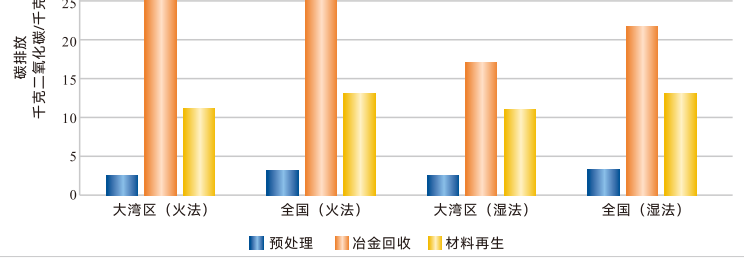


从图中可以看出，无论是NCM电池还是LFP电池，全国平均的材料生产阶段碳排放都高于大湾区。以全国NCM电池为例，其主要材料生产阶段碳排放（按1千瓦时材料计，下同）约28千克，而大湾区主要材料生产阶段碳排放约22千克；全国LFP电池主要材料生产阶段碳排放约37千克，大湾区LFP电池主要材料生产阶段碳排放约30千克。整体而言，大湾区在电池材料生产阶段的碳排放控制得更好，低于全国平均水平。

大湾区储能材料加工碳排放呈现明显区域分化，佛山在电池正极材料和结构件制造方面的产能集中效应较强，碳排放总量高达419.06万吨，远超其他城市。第二梯队为惠州、东莞、江门，该环节碳排放分别为42.74万吨、30.12万吨和30.26万吨。广州、珠海和肇庆碳排放为19万~25万吨。深圳以研发和高端组装为主，该环节碳排放仅为3.28万吨，重排放环节占比比较低。

(3) 电化学储能电芯、Pack与控制设备

大湾区在电芯组装与系统集成环节的碳排放主要来自电极干燥、环境维持及活化测试等高能耗工序，其强度受区域能源结构、工艺水平及供应链布局影响显著。大湾区在系统集成中注重热管理等系统的全周期排放，并通过推广液冷等高效技术优化整体能效。凭借清洁能源、先进工艺和体系化低碳模式，大湾区在此环节展现出更优的碳排放表现，为区域储能产业低碳发展提供了关键路径。



如图8，在电芯与Pack阶段，中国平均碳排放显著高于欧洲和美国。其中，中国平均电芯组装碳排放约9千克/千瓦时，Pack集成碳排放约8千克/千瓦时，总碳排放约17千克/千瓦时；而大湾区电芯组装碳排放约7千克/千瓦时，Pack集成碳排放约6千克/千瓦时，总碳排放约13千克/千瓦时，低于中国平均水平，与欧洲、美国相比也处于较优位置，体现出大湾区在该阶段碳排放控制能力较强。

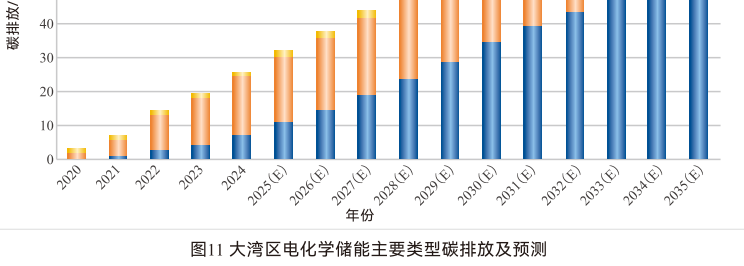
大湾区电芯与Pack环节碳排放呈现显著区域集聚特征，深圳以137.54万吨居首，其研发密集与产业链完善推动排放量较高；广州凭借规模化制造也贡献重要排放。惠州、肇庆等城市在细分领域有所布局，排放规模虽较小，但共同构成区域碳排放的重要组成部分，反映出大湾区该产业分布广泛、协同发展，并凸显其在整个产业链碳排放中的关键地位。

(4) 电化学储能分销

基于现有数据，对大湾区电化学储能产品在分销物流阶段的碳排放情况进行结构性分析。根据核算结果，大湾区电化学储能产品在分销运输阶段的碳排放总量为8.60万吨。其中，针对服务于大湾区内部的仓储与短途运输环节，碳排放量相对较小。面向国内其他省份的公路运输，占总碳排放量的39%。面向海外市场的国际海运，成为了分销环节最大的碳排放来源，占比高达49%。

(5) 回收再利用

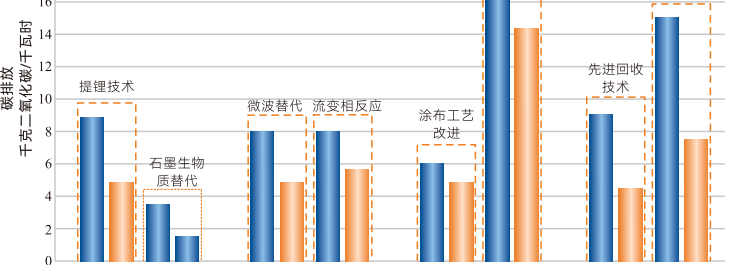
电化学储能系统的回收处理环节碳排放呈现显著的工艺差异性。火法冶金工艺虽然处理效率高，但高温熔炼过程导致碳排放强度明显提升；湿法冶金通过化学浸出降低能耗，展现出更好的低碳特性。预处理环节能耗较低，碳排放强度相对较小，而材料再生阶段则因纯化工艺不同产生排放差异。区域对比显示，在工艺环节碳排放表现均优于全国平均水平（详见图9）。



大湾区电化学储能电池回收环节碳排放存在明显的区域与技术路径差异，佛山因产业布局集中，火法与湿法回收碳排放在区内领先。目前全区火法回收占比58%，湿法占42%，火法虽工艺成熟但碳排放高、锂回收率低；湿法则更环保、金属回收率高，契合欧盟《新电池法》等国际要求。在生产者责任延伸制推动及企业加大湿法投资背景下，该技术占比有望持续提升，推动回收环节向更绿色高效转型。

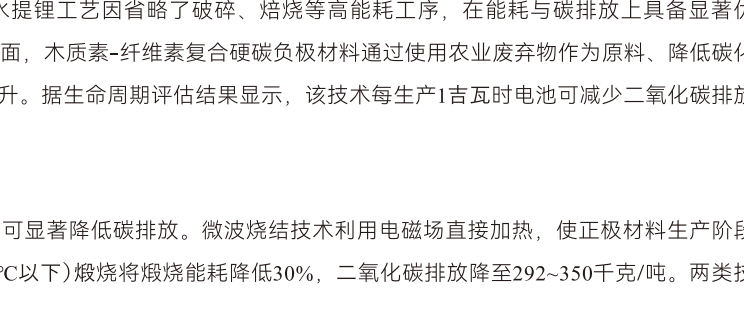
(6) 大湾区电化学储能相关产业碳排放

图10展示了大湾区电化学储能系统全生命周期的碳排放分布，涵盖区域内碳排放（大湾区内部产生的碳排放）、区域外碳排放（大湾区以外地区产生的碳排放），按照生产所在地电力、能源等消费产生的碳排放计算，2024年大湾区电化学储能产业带动上下游全产业链产生碳排放2625.51万吨。其中，大湾区内部生产造成的碳排放共计1109.10万吨，带动的区域外生产造成的碳排放共计1516.41万吨。



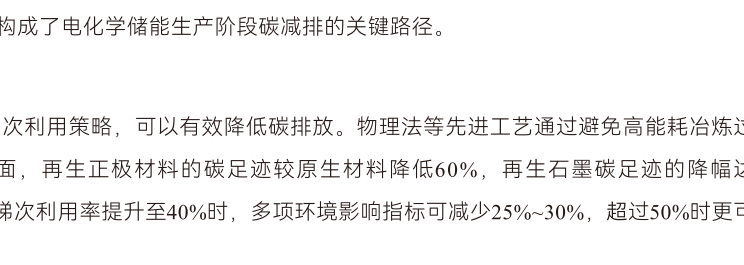
(7) 大湾区电化学储能产业碳排放现状及预测

根据2020—2050年大湾区电化学储能出货量及预测数据，按照现有磷酸铁锂与三元电池市场份额占比4:1计算，计算及预测了2020—2050年大湾区电化学储能碳排放情况（详见图11）。其中，2020—2035年，储能、动力电池、消费电子的碳排放整体呈上升趋势，储能领域碳排放增长最为显著，从初期较低基数持续攀升，成为大湾区电化学储能碳排放的主要贡献部分，反映出电化学储能产业快速发展下，碳排放压力逐渐增大，未来需在产业发展中积极推进电化学储能全产业链的低碳化进程。



5. 电化学储能碳足迹优化策略

在电化学储能各环节采取优化策略后，碳足迹均有不同程度下降，如图12所示。以开采冶炼环节为例，提锂技术等手段使碳排放从原工艺的8.9千克/千瓦时降至改进后的4.85千克/千瓦时；电芯及Pack制造环节原工艺18千克/千瓦时的碳排放，在50%绿电替代和工艺改进后，大幅降至14.4千克/千瓦时。整体而言，通过技术改进、绿电替代等优化策略，电化学储能各环节的碳足迹得到有效降低，减排效果显著。



(1) 优化原材料选择

在开采冶炼环节，相较于传统矿石提锂，地热卤水提锂工艺因省略了破碎、焙烧等高能耗工序，在能耗与碳排放上具备显著优势，推动上游供应链碳足迹降低30%~40%。材料创新方面，木质素-纤维素复合硬碳负极材料通过使用农业废弃物作为原料、降低碳化温度及优化材料结构等措施，实现了能耗降低和性能提升。据生命周期评估结果显示，该技术每生产1吉瓦时电池可减少二氧化碳排放1500~2000吨。

(2) 电化学储能材料生产工艺优化

材料加工环节，通过采用高效节能设备与创新工艺可显著降低碳排放。微波烧结技术利用电磁场直接加热，使正极材料生产阶段碳足迹减少35%~45%。流变相法工艺则通过低温（600℃以下）煅烧将煅烧能耗降低30%，二氧化碳排放降至292~350千克/吨。两类技术共同为推动正极材料低碳制造提供了有效路径。

(3) 改进制造与装配工艺

在电化学储能制造环节，采用可再生能源电力是降低生产阶段碳排放的核心手段，研究表明绿电比例提升至30%与50%时，每吨产品碳排放可分别降低4.43%与7.38%。在工艺层面，通过涂覆优化、LED照明改造及关键设备变频控制等措施，可实现单位能耗显著下降。综合来看，绿电替代、工艺改进与系统优化共同构成了电化学储能生产阶段减排的关键路径。

(4) 提高回收与再利用率

在回收回收、通过先进回收技术、材料再利用及梯次利用策略，可以有效降低碳排放。物理法等先进工艺通过避免高能耗冶炼过程，可实现碳排放降低最高达51.8%。材料再利用方面，再生正极材料的碳足迹较原生材料降低60%，再生石墨碳足迹的降幅达50%。梯次利用同样贡献显著，当退役磷酸铁锂电池的梯次利用率提升至40%时，多项环境影响指标可减少25%~30%，超过50%时更可产生净环境效益。

6. 政策建议

结合大湾区电化学储能发展态势、全生命周期布局与企业概况及其碳排放贡献与影响因素等相关内容，对大湾区电化学储能发展提出如下建议：

(1) 原材料制造阶段：低原料采购+绿色物流

大湾区锂、钴、镍、石墨等关键资源高度依赖进口，阳江港等承担大量矿石进口与中转，建议：

- ▶ 建立“低碳原料”政府采购与产业目录；
- ▶ “绿色港口+绿色航运”联动；
- ▶ 原料多元化与材料替代前瞻布局。

(2) 材料生产阶段：园区绿电+工艺节能+过程治理

大湾区已形成正极、负极、隔膜、电解液等材料在珠三角多地的专业化集聚，具备园区化治理基础，建议：

- ▶ “园区绿电比例+负荷管理”双目标考核；
- ▶ 关键工序绩效基准与改造补贴；
- ▶ “一园一方案”的氟化工与挥发性有机物（VOCs）治理。

(3) 电芯、Pack与控制设备制造阶段：低碳制造标准+数智化控制

大湾区聚集电芯、Pack与控制设备头部企业，深圳相关企业数量多、产值高，广州、惠州等地建有国家新型储能创新中心等平台，且已有毫秒级响应的系统示范，建议：

- ▶ “低碳产线”分级认证与白名单采购；
 - ▶ 过程数据接入与“碳-能-质”三联控；
 - ▶ 功率变换与热管理设计；
 - ▶ 模块化与可拆解设计。
- #### (4) 回收与再利用阶段：建立“生产者延伸责任+跨关区闭环”的制度栈
- ▶ 强制生产者延伸责任与最小再生含量；
 - ▶ “统一编码+全链追溯”；
 - ▶ “场景+电芯”梯次映射库；
 - ▶ 再生工艺低碳改造。

(5) 跨阶段的支撑性政策与治理机制

- ▶ 标准与认证体系；
- ▶ 数据与市场对接；
- ▶ 产业基金与首位（套）；
- ▶ 园区化实施路径。

(6) 实施精准化、差异化的激励与约束政策

- ▶ 产业链升级策略；
- ▶ 低碳产业政策导向；
- ▶ 提高标准与规则能力。

*本白皮书使用的电力碳足迹因子采用生态环境部等机关发布的《2023年电力碳排放因子数据》

**本白皮书数据收集的截止时间至2025年9月

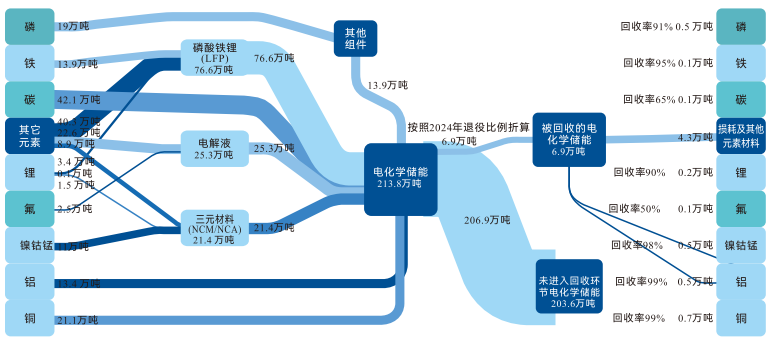
粤港澳大湾区电化学储能碳足迹白皮书

摘要

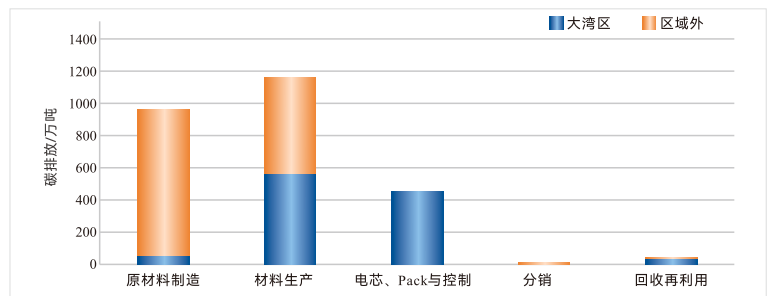
面对全球气候挑战及“双碳”目标要求，粤港澳大湾区（以下简称“大湾区”）依托政策与产业优势，积极发展电化学储能以推动能源低碳转型，该区域已成为我国储能产业集聚高地。其中，深圳作为产业核心区，2024年储能总产值突破3000亿元，锂电池出口约900亿元，有效支撑高比例可再生能源并网与系统灵活性提升。为科学评估电化学储能领域的碳减排贡献，需建立以全生命周期碳足迹（LCF）为核心的评价体系，系统核算从资源开采到回收再利用各环节的碳排放，识别热点与敏感因子，推动产品生态设计、供应链协同与政策制定。本白皮书¹基于ISO和欧盟《新电池法》标准，针对磷酸铁锂电池（LFP）与镍钴锰三元电池（NCM）构建统一的碳足迹核算范式，量化回收再利用等环节的减排潜力，为大湾区电化学储能低碳发展提供量化依据与政策建议。

右图所示为2024年大湾区锂离子电池产业的物质流分析结果。数据显示，为生产约145.89吨锂离子电池，共消耗磷酸铁锂和三元正极材料超过50万吨。然而，全年仅75%的报废电池进入回收环节。在回收过程中，不同材料效率差异显著：集流体（铜箔、铝箔）回收率约99%，镍、钴、锰等关键金属回收率达98%，而氟元素回收率最低，仅为50%，是目前回收技术中的主要难点。

右图展示了大湾区电化学储能系统全生命周期的碳排放分布，涵盖区域内碳排放（大湾区内部产生的碳排放）、区域外碳排放（大湾区以外地区产生的碳排放），按照生产所在地电力、能源等消费产生的碳排放计算，2024年大湾区电化学储能产业带动上下游全产业链产生碳排放2625.51万吨。其中，大湾区内部生产造成的碳排放共计1109.10万吨，带动的区域外生产造成的碳排放共计1516.41万吨。



2024年大湾区电化学储能物质流



2024年大湾区电化学储能全生命周期碳排放

(本部分为截取内容，具体内容请点击粤港澳大湾区电化学储能碳足迹白皮书 摘要)