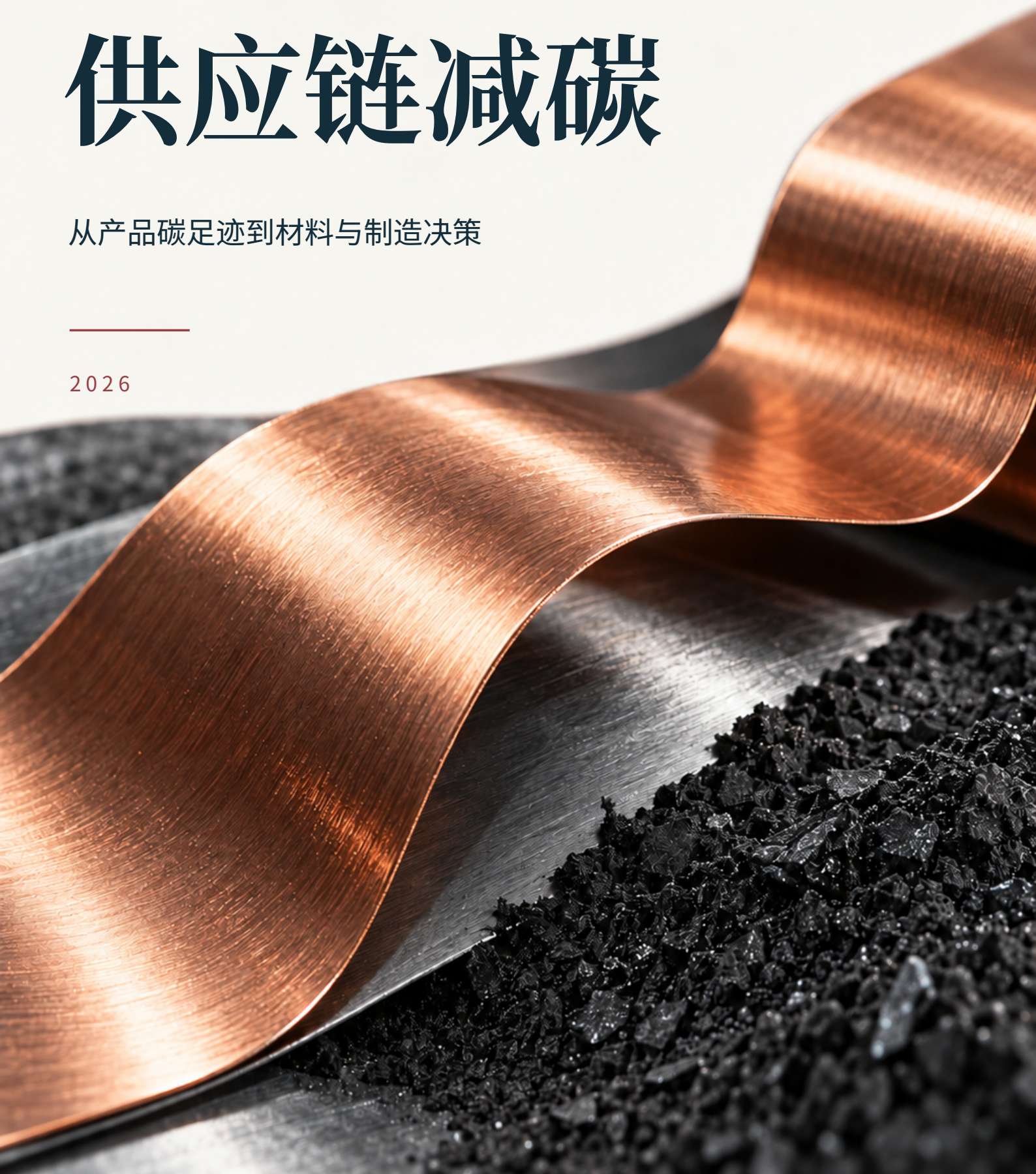


锂电池 供应链减碳

从产品碳足迹到材料与制造决策

2026



减碳的关键， 是找到可改变的环节

同样是锂电池，材料体系、供应路径和工厂运行条件不同，减碳的着力点也会改变。企业需要把碳足迹拆解到可以选择、可以控制的变量。

01 材料来源，影响采购的减碳空间

对材料贡献较高的产品，优先追溯矿物加工与活性材料路线。比较应落实到具体产品、产地和生产条件，避免只依据供应商提供的汇总数字排序。

02 工厂效率，需要合格产出来解释

制造用能应与工序、公共设施、负荷和良率一起分析。能源总量下降与单位产品改善并不总是同时发生，产量和产品组合的变化也会影响结果。

03 循环收益，取决于替代发生在哪里

回收材料重新进入哪种产品、替代多少原生投入，以及增加哪些处理负担，决定循环方案的净效果。回收量本身不足以说明减碳价值。

让核算连接采购、生产与材料循环，才能形成具体的行动选择。

来源：IEA, 2024；Machala et al, 2025

把减碳问题，连接到行动

从产品边界到材料、制造与循环，再回到可执行的选择。

01	减碳机会，藏在差异之中	02
02	从材料差异进入采购决策	06
03	把用能与合格产出连接起来	10
04	让循环材料真正替代原生投入	15
05	从单项机会走向可执行的组合	19
06	从一个产品开始，形成持续改进	22
07	方法与来源	26
	参考文献	28

把一个总量， 拆成三个决策

产品碳足迹的经营价值，在于解释不同选择如何改变同一产品。

同一产品，三类可改变的变量

采购

来源 · 路线 · 替换比例

形成可供选择的合格材料集合

采购需要比较通过性能和供货要求的材料；生产需要识别能耗与损失在哪些工序发生；研发需要判断配方、结构或工艺改变是否影响寿命和质量。三类问题可以共享数据，但不能用一个总排放量代替各自的分析。

生产

用能 · 负荷 · 良率

确定可测量的工序改进点

先选定一个有明确业务需求的产品，把物料清单、产线和供应路径连接起来。这样，分析结果才能落实到具体采购选项、计量任务和试点方案，而不是停留在年度汇报中。

研发

配方 · 结构 · 使用性能

检验产品改变的连锁影响

先确定要改变的选择，再确定需要收集的数据。

产品边界， 决定比较是否成立

电芯、电池包与全寿命服务分别对应不同的投入和交付。

按决策问题选择边界



材料与制造比较 → 出厂边界；性能与寿命改变 → 扩展至同等服务。

材料与制造改进可先在原料获取至合格电芯出厂的范围内比较。若方案同时改变电池包结构、使用效率或寿命，则需要把这些变化加入相应模块，不能只截取制造端较有利的一段。

出厂容量、可用容量与寿命期交付电量不是相同分母。对相同规格的采购选择，可以比较出厂产品；对承担同一服务的不同产品，则应把性能、运行条件和更换需求一起纳入。边界与功能单位应先于方案排序确定。

比较的起点，是相同的交付要求。

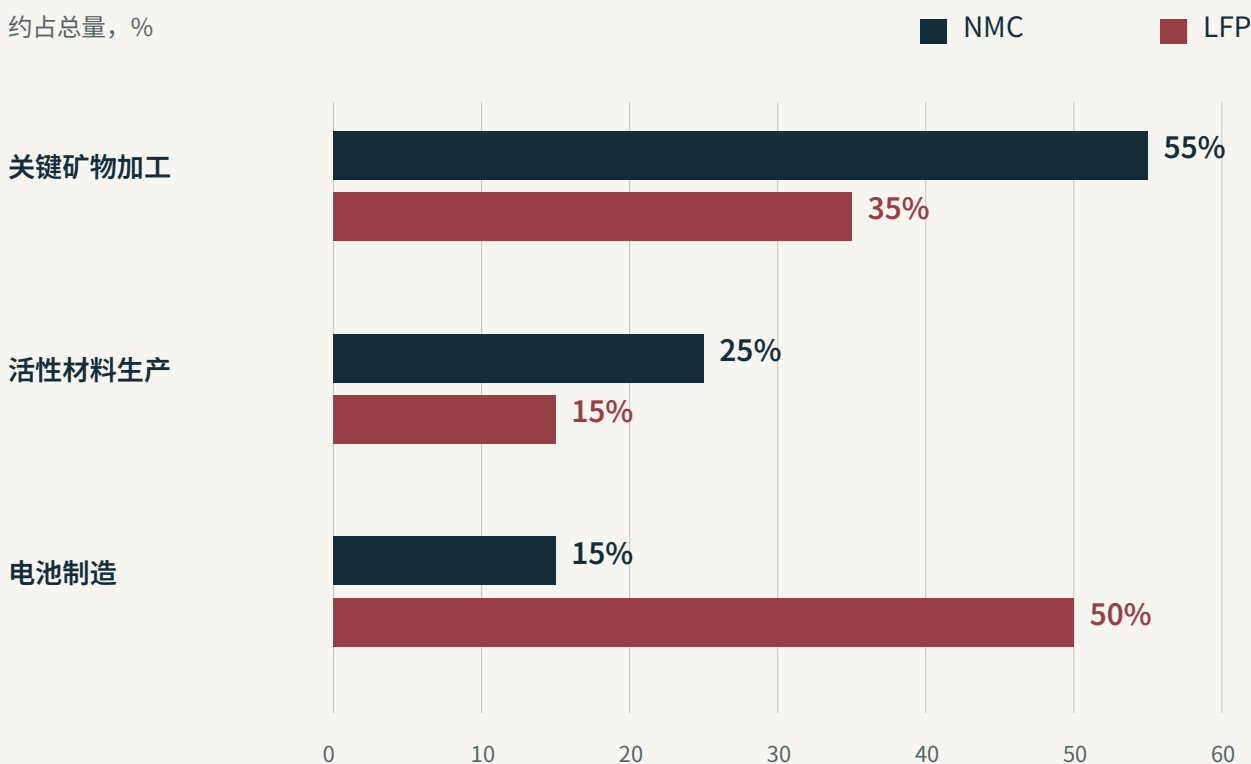
来源：WRI / WBCSD, 2011

减碳重点， 随电池体系而变

NMC 的排放更集中于上游材料；LFP 的制造环节贡献更突出。改进优先序，需要回到各自的工艺与能源条件。

电池生产各环节的排放贡献

约占总量，%



来源：IEA, 2024。环节占比为近似值；NMC 另有约 5% 未列出。

采购：比较同等性能下的材料

将矿物来源、精炼路线和供应商能源条件纳入比较，识别可以通过采购改变的排放。先形成性能与供货条件一致的候选集合，再评估替代收益。

制造：把能耗连接到合格产出

将工序用能、公共设施负荷与良率一起分析。用实际合格产量解释单位能耗，再判断节能、产线优化和低碳电力的组合价值。

让供应商差异， 成为可比较的采购选择

同等性能和稳定供货是进入比较的前提。碳数据的作用，是解释候选材料的差异，并判断这些差异能否转化为产品收益。

比较维度	需要解释的差异	进入决策的证据
材料与路线	矿物来源、精炼及前驱体工艺	对应具体产品和产地的过程数据
能源与时间	电力、热源及生产期的变化	能源用量、因子与适用年份
核算口径	边界、分配及背景数据版本	方法说明与可复算的输入
替换条件	性能、认证、供货量与损耗	合格材料清单与实际替换比例

先解释差异的来源，再计算可实现的替换收益。

只比较可进入产品的选项

用质量、供货和认证条件限定候选集合，避免把技术上不可替代的材料放入同一排名。

让碳数据跟随采购更新

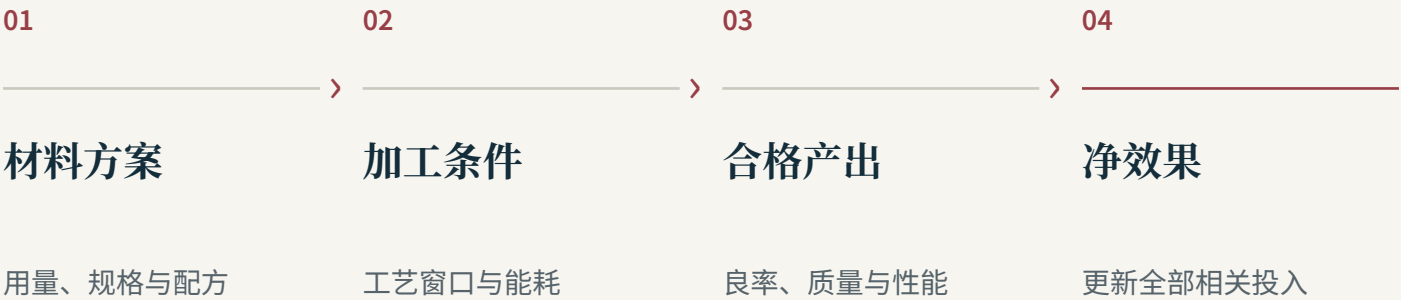
当原料、能源或工艺变化时更新证据，使低碳采购成为持续管理，而非一次性问卷。

来源：WRI / WBCSD, 2011

正极之外， 检查材料改变的连锁影响

材料减量或替代的收益，需要在完整电芯上检验。

从材料变化，追到合格产品



试验同时记录材料、能源与质量，避免把关联变化留在模型之外。

铜铝箔、石墨、电解液、隔膜和辅助材料应与正极一起进入物料清单。分析时保留采购量、投入量、合格产出与废料去向之间的关系，才能识别材料损失和遗漏。

更薄的箔材或不同的配方可能改变加工窗口、良率和使用表现。评价方案时，需要同时更新相关制造参数；只计算某一项原料的减少，容易忽略新增能耗或损耗。跨部门试验的价值，在于验证这些关联是否改变净收益。

材料的局部改善，需要经受完整产品的检验。

本土化过程数据， 让差异可被追溯

背景数据提供上游过程，企业记录决定产品的实际路径。

过程粒度，使供应路径可以连接

75

原料获取与预处理

52

主要产品生产

87

寿命末端与回收

214 个过程 / 3,197 条流 / 53 项来源

中国锂电池单元过程数据集整理了来自53项来源的214个过程、3,197条流。论文将过程划分为原料获取与预处理、主要产品生产、寿命末端与回收三个阶段，分别包含75、52和87个过程。这样的粒度为追溯差异提供了基础。

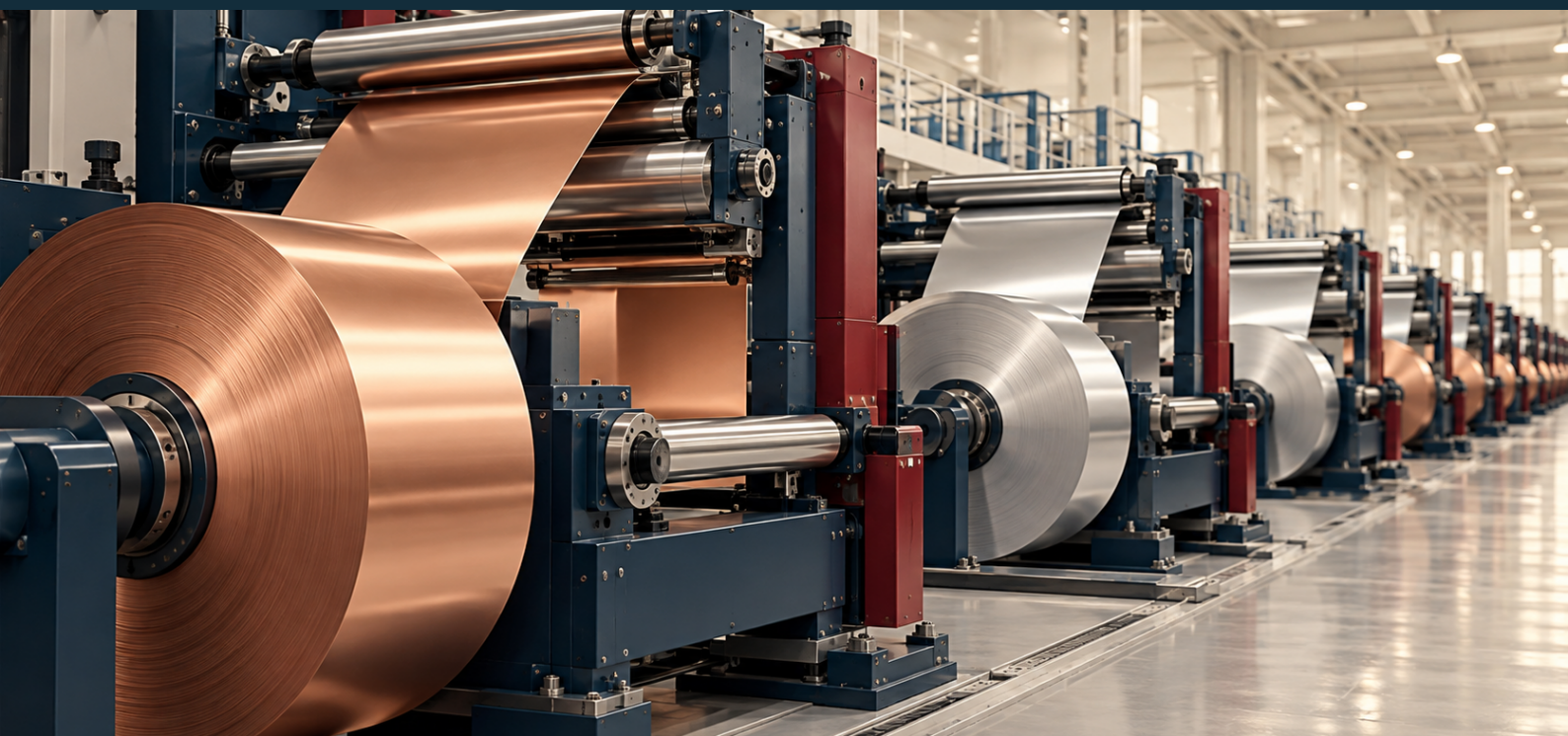
在企业模型中，物料清单、供应来源和能源计量应描述实际前景过程。背景过程则按地区、技术、年份与边界选择。已有数据的价值，不在于省略匹配判断，而在于让缺口有可追溯的起点，并让关键数据能逐步被实测替换。

用可追溯的背景起步，用关键实测逐步提高精度。

来源：Tian et al, 2024；Xie et al, 2024；高晗博等, 2025

制造减碳， 先解释每一度电

同一份能源账单，可能对应不同的产量、产品组合与运行阶段。把用能与合格产出连接起来，才能识别真正可以持续的效率改善。



01

工序用能

按涂布干燥、化成等环节建立计量，定位实际热点。

02

公共设施

将干燥环境及辅助系统负荷连接到对应产线与时段。

03

合格产出

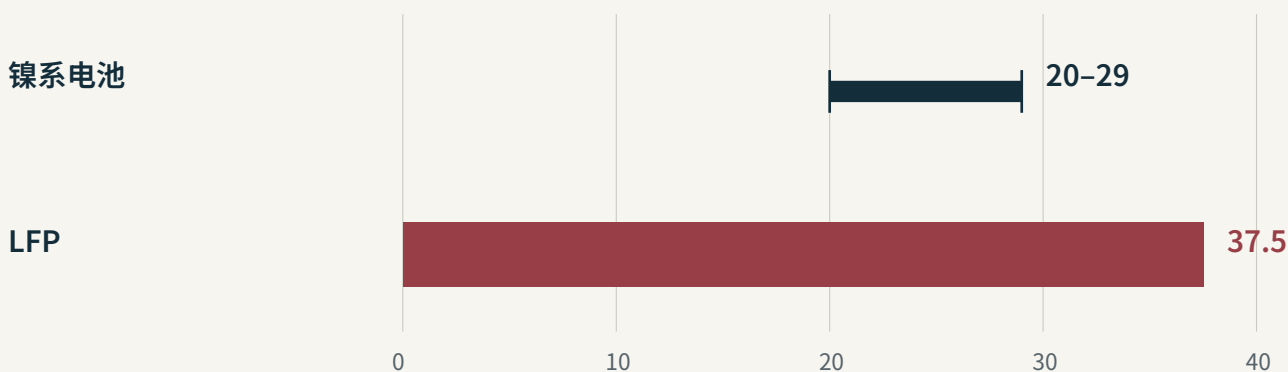
同步记录产量、良率与产品组合，解释单位能耗的变化。

来源：Degen et al, 2023；Knehr et al, 2024

文献提供量级， 现场计量决定投向

不同制造模型的能耗差异，需要结合工艺和运行条件理解。

电芯制造能耗模型



kWh 生产能耗 / kWh 电芯容量；不含材料开采与精炼。

Degen等的制造模型中，镍系电池约为20-29 kWh生产能耗/kWh电芯容量，LFP为37.5。该范围不含材料开采与精炼，反映的是特定制造模型。它提示企业检查过程差异，不能直接用作工厂目标或跨体系总足迹排名。

现场诊断应将电和热分开，识别涂布干燥、化成、干燥环境及辅助系统各自的负担。对没有分项计量的工厂，优先建立能解释主要变化的测量点，比全面增加报表字段更有用。

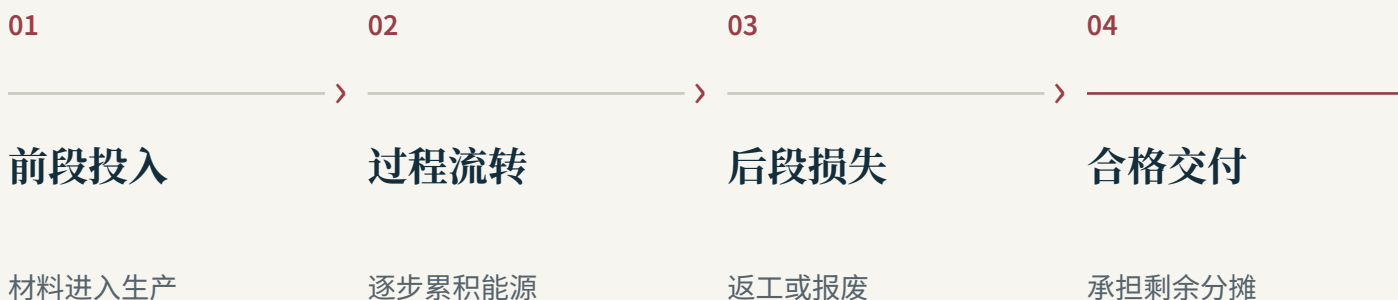
把测量点放在能解释差异、也能支持行动的位置。

来源：Degen et al, 2023；Knehr et al, 2024

良率改善， 同时改变材料与能源分摊

损失发生的工序不同，合格产品承担的负担也不同。

损失的位置，决定已投入的负担



沿关键工序记录投入、返工与报废；同时追溯废料去向。

同样数量的废品，发生在前段和完成大部分制造步骤之后，对已消耗材料与能源的影响不同。应按关键工序记录投入、流转、返工与报废，避免仅用全厂平均良率解释所有损失。

改进评价需要把损失减少、返工能耗和废料处理一起纳入。若良率提高伴随更长的加工时间或额外处理，应重算单位合格产出的净变化；质量改善的环境收益不能只根据某一个比例推断。

先识别损失发生在哪里，再计算改善带来的净收益。

看清基础负荷， 才能解释单位能耗

产量、运行时间与能源数量需要一起观察。单一的每千瓦时电芯能耗，可能隐藏不同的运行原因。

单位能耗，需要三个量共同解释

01

基础用能

环境与辅助系统

02

过程用能

随生产变化的投入

03

合格产出

同一时段与产品组合

单位能耗 = (基础用能 + 过程用能) / 合格产出

把一段运行期的用能拆为维持环境与辅助系统所需的基础负荷，以及随加工量变化的过程用能，再与合格产出对应。两类负荷在现场并非完全固定或线性，分解的作用是帮助定位需要计量和验证的关系。

若合格产出增长快于基础用能，单位分摊可能下降；这并不自动证明设备效率改善。评价改造时，应对齐产品组合、开机时长、环境要求和良率，分别解释产量效应与工艺变化。

单位能耗降低，需要解释效率、产量与质量各自的作用。

来源：Degen et al, 2023；Knehr et al, 2024

节电与低碳电力， 共同作用于同一负担

能源数量和排放因子应分别记录，组合结果从底层重算。

组合效果，回到底层重新计算

$$Q0 \times f0$$

基线电力排放

Q：用电量；f：适用排放因子。净减少量 = $Q0f0 - Q1f1$ 。

减少用电量与降低供电排放因子，都作用于电力相关排放。若分别按原基线计算后直接相加，会重复计算部分收益。用更新后的用电量乘以更新后的适用因子，才能得到组合负担。

$$Q1 \times f1$$

改变后的电力排放

电力的物理供应、合同凭证、适用时间与核算规则应保持关联。企业购电报告与产品碳足迹可能采用不同要求，采购某种电力凭证并不自动决定所有产品申报的处理方式。

一次更新数量，一次更新因子，一次计算组合结果。

来源：GHG Protocol, 2015

循环的价值， 在下一次材料选择中兑现

从回收端的产量，走向制造端可用的原料，循环方案才与产品减碳真正连接。



01

识别进料

区分生产废料与寿命末端电池，
保留成分和收集条件。

02

确认质量

把回收产物的规格与下一轮生产
要求对应起来。

03

核实替代

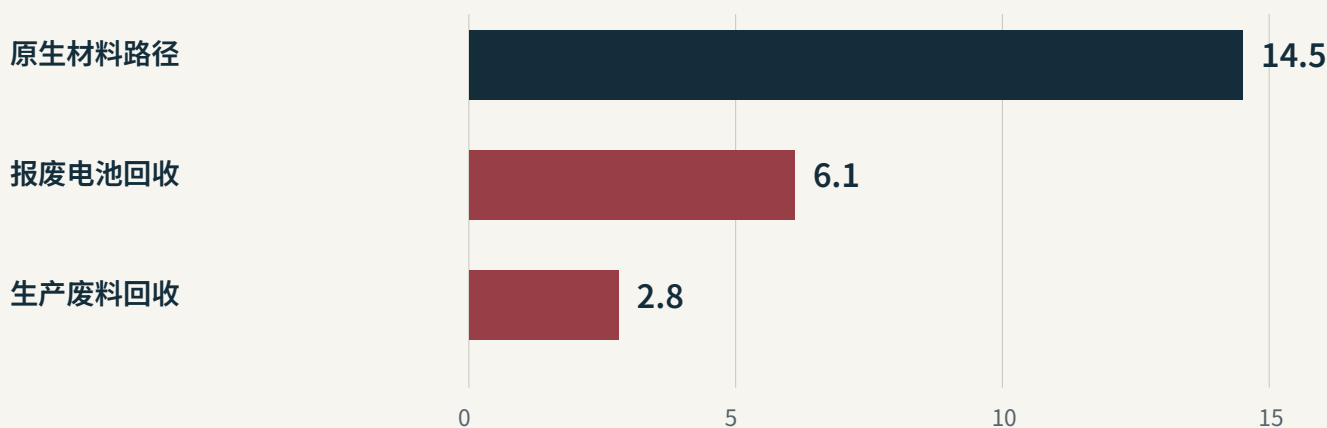
按实际可替代用途和比例，计算
净环境变化。

来源：Machala et al, 2025；WRI / WBCSD, 2011

循环利用的收益， 来自具体工艺与替代关系

回收路径的环境表现，需要回到投入、产物与能源条件。

门到门精炼的温室气体排放



kg CO₂e / kg NCA 当量；以 2021 年数据为主，产物形式不同。

Machala 等对工业回收与原生材料供应链进行了生命周期比较。其门到门精炼结果中，原生路径、报废电池回收和生产废料回收分别为 14.5、6.1 和 2.8 kg CO₂e/kg NCA 当量。研究以 2021 年数据为主，比较产物的元素当量相同，具体产品形式存在差异。

这些结果说明回收原料与工艺条件值得单独评估。生产废料和寿命末端电池不能简单视为同一种进料；收集、预处理与精炼路径应逐项匹配。企业需要把拟采用路径的实际条件带入模型，再判断能否获得同方向的收益。

研究揭示可能性，路线匹配决定结果能否迁移。

来源：Machala et al, 2025

回收率之外， 还要问替代了什么

只有改变后续生产投入的那部分回收材料，才进入相应替代分析。

新增负担与实际替代，应在同一边界下比较

新增负担

收集 · 运输 · 处理

回收产物的生产与使用条件

分析替代效应时：净变化 = 新增负担 - 避免的负担；分配方法应另行明确。

循环方案应明确再生材料的质量、用途和可替代比例。进入电池级用途与进入其他用途对应不同的比较对象；回收产量不能直接等同于减少的原材料量。

循环方案的比较对象，是它真正改变的生产路径。

来源：WRI / WBCSD, 2011

避免的负担

实际被替代的原生路径

按质量、用途与替代比例匹配

净效果由新增的收集、处理、运输负担，与实际被替代路径的负担共同决定。两者的边界、时间和产品功能必须一致。对多种回收产物，还需要说明如何分配环境负担，避免在多个主体之间重复主张同一项收益。

从电芯到服务， 寿命会改变比较结果

制造端较低的足迹，未必对应同等服务下更低的总影响。

从交付产品，扩展到交付服务



功能单位应反映比较目的，而非只沿用最方便取得的分母。

当材料或产品方案影响寿命、效率和更换频率时，比较应扩展到同一服务。储能系统需要考虑实际循环、衰减与运行条件；动力电池则需要与对应车辆使用需求一致。

制造阶段与使用阶段可以共享基础数据，但应分别保留边界和假设。跨应用讨论时，不应直接套用统一的每千瓦时排名。真正有价值的结果，是说明在何种用途与运行条件下，某项优势能够保留下来。

把制造优势带到同等服务中，才完成了产品比较。

来源：WRI / WBCSD, 2011

先识别关联， 再比较组合收益

材料、工艺与能源选择可能同时改变同一过程。

把措施落到共同的过程变量

材料替换

供应因子 ↔ 加工条件

良率改善

材料投入 ↔ 单位用能

运行优化

产能利用 ↔ 基础分摊

组合方案只保留一套更新后的输入；每项物理变化只计入一次。

低碳材料替代可能改变工序条件，良率改善可能改变材料消耗，产线运行变化可能影响单位能源分摊。方案模型应更新这些有关联的参数，而非只调整每项措施最有利的输入。

组合分析的价值在于发现相互促进、重复计算和新增负担。每项方案都应保留改动了什么、为什么改动，以及哪些输入尚未改变，使技术团队能将模型与实际试点一一对应。

把关联变化算进去，组合收益才有实施意义。

优先补充， 会改变选择的数据

数据工作的优先序，应由决策敏感性来决定。

让不确定性决定下一步

排序稳定	证据较充分	推进可行性与试点验证
排序稳定	证据不足	确认关键边界与适用条件
排序易变	证据较充分	按条件分情景组织选择
排序易变	证据不足	先补测可能改变结论的输入

把供应因子、用能、良率和替代比例放入合理区间，观察方案排序是否改变。如果某个参数的小幅变化就会颠倒结论，它应成为优先核实的对象。区间需要来自可实现条件，不能任意组合所有有利假设。

当多个合理条件下排序仍稳定时，可以进入可行性验证；若结论容易反转，则先补证据。这样的工作顺序让数据投入直接服务行动，也避免让所有缺口获得相同优先级。

下一份数据，应当帮助回答下一项决定。

将碳、成本与质量， 放到同一决策表

低碳方案需要同时通过产品与经营条件的检验。

按准入条件组织比较

产品与供应	性能、质量、认证、供货	确定可行集合
环境净效果	统一边界、关联变化、敏感性	识别有条件的优势
经营与实施	投资、运行成本、周期、责任	安排试点与投资

以同一产品和产量基线，列明新增投资、能源材料节约、维护、认证与运行变化。成本情景与环境情景共用一致的物理输入，但分别保留价格、寿命和核算假设。

可先用技术可行性、性能和供应条件筛选方案，再比较净减排与增量成本。近期运行改善和长期技改不必挤进一个统一排名；按准备条件组织不同时间尺度的行动，更便于进入投资与生产安排。

先通过产品准入，再按条件安排低碳行动。

从一个产品开始， 形成可持续的改进路径

把范围、证据、方案与验证依次连接，让每一步都产生下一步可以使用的成果。

阶段成果

01 锁定一个问题

产品范围与决策目标

选定产品、工厂与用途，明确这次分析要支持的采购或生产决定。

02 建立共同底表

可复算基线与热点

连接物料、能源、产量与来源，先补会改变判断的关键缺口。

03 比较可行方案

候选方案与试点条件

纳入性能、供货和成本约束，检验组合关系与敏感变量。

04 验证并持续更新

验证结果与更新机制

按一致口径复算实际变化，将有效做法延伸到产品族和供应网络。

下一次产品更新，应能沿用已经建立的数据与方法。

把一次分析， 留下来继续使用

可维护的数据包能够解释结果为什么改变。

从原始记录，到可解释的更新



每一次更新都应能追溯到输入、计算和变更原因。

保留原始数量、单位、来源、时间、适用产品与责任人。计算关系和背景因子单独管理，结果与输入版本保持对应，后续更新才能区分实际生产改善、数据替换和方法调整。

为供应来源、产线工艺和背景因子设定更新触发条件。供应商变更、产量结构改变或数据版本升级后，沿用同一计算关系复算，并把变化拆解到具体原因。这样，数据包才能支持下一轮采购、产品迭代与工厂改进。

保留的不只是结果，还有下一次更新的能力。

把复核， 放进工作过程

质量检查应从输入开始，贯穿模型与结论。

在三处设置复核节点

输入

物料与能源是否闭合？

采购、库存、生产与废料记录相互核对。

用采购、库存、产出和废物记录解释关键物料流；用能源与生产记录解释主要负荷。异常应先查明原因，再进入方案比较，避免将缺项或口径变化误判为改善。

模型

关系与单位是否一致？

检查重复过程、分配、单位换算与关联参数。

模型复核关注单位、过程重复、分配与参数关联；对外表述核对结果边界、证据和适用用途。客户沟通、比较性声明与法规申报的验证要求应分别确认。

表述

结论与用途是否匹配？

核对边界、来源、有效条件与所需验证。

让每一项结论，都能回到对应的过程与证据。

来源：WRI / WBCSD, 2011

让研究与数据， 进入下一项决定

材料选择、工厂改善与循环方案，都可以从一个具体问题开始。

从三个具体问题进入合作

材料选择

供应商差异如何解释？

连接材料路线、方法口径与可替换条件。

讨论可以从产品类型、当前选择和现有数据概况展开：是供应商之间的差异难以解释，还是制造能耗无法定位，或者循环方案的净收益仍不清楚？先明确问题，再确定需要连接的过程与证据。

工厂改善

能耗变化发生在哪里？

连接计量、负荷、良率与合格产出。

本土化单元过程数据与产品碳足迹研究，为锂电池供应链分析提供了可查阅的方法基础。把这些基础与企业实际记录连接，可以形成基线、贡献分解、条件化方案和验证路径。相关公开研究与团队信息见 [Tiangong Discover](#)。

循环方案

回收之后替代了什么？

连接回收质量、实际用途与替代路径。

从一个清晰的问题，开始建立共同的分析基础。

来源：Tian et al, 2024；高晗博等, 2025

同一项比较， 保持一致的口径

所有量化结果应与其边界、功能单位和数据时期一起使用。

每一项比较，都保留四个坐标

对象与功能	相同产品，或相同服务	明确分母和性能条件
范围与时间	过程边界、工厂与生产期	解释纳入与排除项
数据与方法	技术、地区、分配、背景版本	保留可复算的输入
结果与解释	总量、贡献、情景和限制	不将占比用作总量排名

生产环节比较以合格电芯出厂为核心；涉及包体、使用或终端处理的变化另建模块。对性能和寿命不同的方案，以相同服务要求建立比较。背景过程按技术、地区、时间及边界匹配，替换记录保留原来源。

文献结果按原有边界与数据时期引用；企业方案使用实际产品与过程数据复算。情景计算保留输入、公式和适用条件，区分生产变化与数据更新的影响。环节占比说明贡献结构，不直接代表不同产品总量的高低。

口径保持一致，变化才具有可解释性。

来源：WRI / WBCSD, 2011

数据可以复用， 规则需要分别核对

内部改善、客户沟通与法规申报可以共享输入，但各自遵循相应规则。

同一底表，对应不同使用规则

内部改善	实际过程与可控变量	服务采购与生产选择
客户沟通	约定口径与所需证据	保证结果可解释、可核对
法规申报	产品类别、时点与有效规则	按具体义务核实方法与验证

电池护照：字段的适用性与生效时点应逐项管理。

欧盟电池护照的启用与其中各类信息义务存在不同适用时点。产品类别、碳足迹、再生含量及其他字段应逐项核对，不能将一个日期套用于所有义务。

规则管理可落到字段来源、责任人、更新频率与访问权限。用于申报的计算方法、验证程序和有效文本应在具体用途确定后核实，并与内部改进模型保持版本对应。

让共同的数据基础，支持各自合规的使用场景。

来源：European Commission, 2026；European Commission, 2026-08-21；European Union, 2026-08-13

研究与数据

正文中的研究数据保留其原有边界与适用条件。

01 China-specific unit process dataset for lithium-ion batteries

Tian et al, 2024

[doi.org](#)

02 China-specific Lithium-ion Battery Unit Process Dataset, v1

Xie et al, 2024

[data.mendeley.com](#)

03 我国本土化产品碳足迹核算研究：以锂电池产业为例

高晗博等, 2025

[www.engineering.org.cn](#)

04 Global EV Outlook 2024: Outlook for emissions reductions

IEA, 2024

[www.iea.org](#)

资料核对：2026年10月27日

制造与核算方法

正文中的研究数据保留其原有边界与适用条件。

05 Energy consumption of current and future production of lithium-ion and post lithium-ion battery cells

Degen et al, 2023

www.nature.com

06 Energy consumption of lithium-ion pouch cell manufacturing plants

Knehr et al, 2024

doi.org

07 Life cycle comparison of industrial-scale lithium-ion battery recycling and mining supply chains

Machala et al, 2025

www.nature.com

08 Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard: Chapters 6 and 9

WRI / WBCSD, 2011

ghgprotocol.org

市场规则与数据要求

正文中的研究数据保留其原有边界与适用条件。

09 Scope 2 Guidance

GHG Protocol, 2015

ghgprotocol.org

10 EU Digital Product Passport FAQ for Batteries

European Commission, 2026

single-market-economy.ec.europa.eu

11 Guidance to support preparations for the Digital Batteries Passport

European Commission, 2026-08-21

single-market-economy.ec.europa.eu

12 Regulation (EU) 2023/1542, consolidated text

European Union, 2026-08-13

eur-lex.europa.eu

资料核对：2026年10月27日

下一项决定， 需要哪些证据？

把研究结论带回一个具体产品，用可验证的条件推动下一步。

-
- | | | |
|----|------|----------------------|
| 01 | 范围一致 | 比较对象、功能单位、工厂和时间是否对齐？ |
|----|------|----------------------|
-
- | | | |
|----|-------|---------------------|
| 02 | 差异可解释 | 变化来自生产条件，还是数据与方法不同？ |
|----|-------|---------------------|
-
- | | | |
|----|-------|----------------------|
| 03 | 替换可实现 | 性能、供货、认证和实际替换比例是否成立？ |
|----|-------|----------------------|
-
- | | | |
|----|-------|---------------------|
| 04 | 净效果可信 | 新增负担、参数关联和不确定性是否纳入？ |
|----|-------|---------------------|
-
- | | | |
|----|-------|----------------------|
| 05 | 结果可延续 | 谁更新输入，何时复算，如何验证实际变化？ |
|----|-------|----------------------|
-

以证据推进每一步，让减碳成为持续的产品能力。

让下一项决定， 有更清楚的依据。

从一个产品、一条产线或一种材料开始，连接过程数据与企业实际，识别可实现的减碳路径。

研究与团队

discover.tiangong.earth

TIANGONGDISCOVER