

第5章 碳足迹计量

碳足迹计量是对特定实体（如个人、组织、产品、服务、事件或国家）活动所引致的温室气体（GHG）排放与清除进行量化评估的过程。该计量涵盖排放源识别、气体组分分析、排放量核算以及清除速率测定，以最终确定净排放水平。

术语“碳足迹”虽以“碳”指代（因二氧化碳（CO₂）是主要人为产生的，如图 5.1 所示，但其核算范围包含所有关键温室气体（如甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）等）。为确保结果可比性，各类温室气体排放均依据其全球增温潜势（GWP）统一折算为二氧化碳当量（CO₂）。

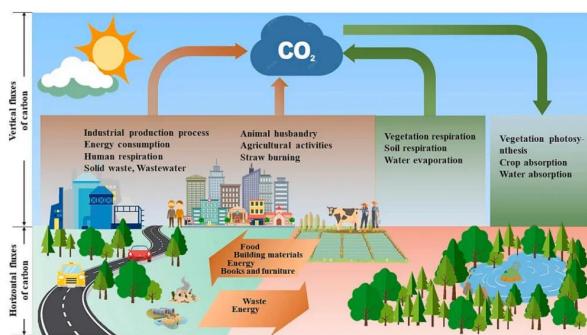


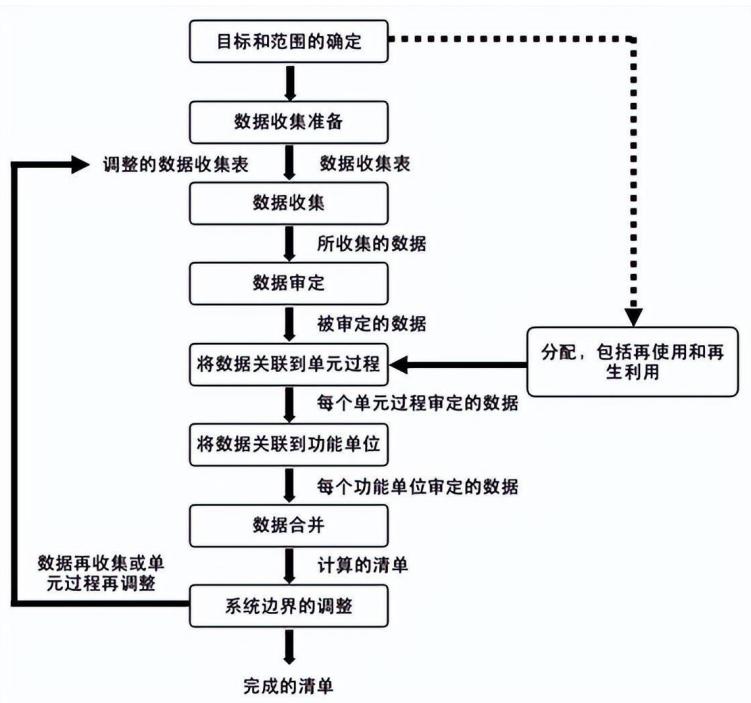
图 5.1 碳排放来源图

“碳足迹”常被误认为等同于“能源足迹”，这源于化石能源燃烧是多数情景下的主导排放源。然而，严谨的碳足迹计量必须涵盖更广泛的排放源，包括工业过程、农业活动、土地利用变化及废弃物管理等，这些来源依据核算主体的特征可能至关重要。

碳足迹计量通常通过系统化的审核流程实施，涉及数据追踪、量化及设施核查，旨在识别减排路径（如能效提升、工艺改进或资源优化），从而实现能源消耗与温室气体排放的协同降低。

5.1 碳足迹计量标准

碳足迹计量可针对产品（或服务）或特定组织实体（如个人、团体、企业、政府）的活动进行。产品碳足迹（Product Carbon Footprint, PCF）通常在生命周期评价（LCA）框架下实施，如图 5.2 所示，量化报告商品或服务全生命周期或特定阶段的温室气体排放。组织碳足迹则指核算特定实体（如企业、政府）活动在特定时期（通常为年度）产生的温室气体排放清单。



如图 5.2 生命周期清单分析的基本步骤。

在产品碳核算领域，投入产出分析方法应用有限，且国际标准化程度较低。相反，基于 LCA 的方法已成为国际主流，其方法学体系相对成熟。多个国家、地区及组织已据此制定并颁布了专门的 PCF 标准与规范。其中，ISO/TS 14067、英国标准协会（BSI）的 PAS 2050 以及世界资源研究所（WRI）与世界可持续发展工商理事会（WBCSD）联合发布的《温室气体核算体系：产品标准》（GHG Protocol Product Standard）应用最为广泛。美国、日本、德国、韩国等国家也普遍参考上述核心标准，制定本国规范，推动产品碳排放量化，并据此实施碳标签制度，如图 5.3 所示。



来源：欧盟委员会

图 5.3 多样化碳标签

5.1.1 基于产品的碳足迹标准

产品碳足迹核算（亦称产品碳核算）指量化产品全生命周期（涵盖原材料获取、生产、运输、使用至废弃/回收阶段）温室气体排放与清除的过程。依据核算目标及产品特性，主要采用投入产出法（IOA）与生命周期评价法（LCA）。前者适用于宏观产品类别核算，

能有效捕捉产业部门间隐性关联，但难以精准表征产品生产、使用及回收等微观细节；后者聚焦于微观产品，可系统呈现生命周期各阶段排放，然其数据需求量大、工作复杂度高，且环节数据缺失易导致结果不确定性增加。

当前投入产出法在国际产品碳核算领域应用有限且缺乏统一标准。鉴于实际核算对象多为中微观产品，LCA 法已成为国际主流方法论，其标准化体系相对成熟。国际主流标准包括：ISO 14067（产品碳足迹量化与沟通规范）、PAS 2050（英国标准协会产品碳足迹规范）及 GHG Protocol Product Standard（WRI 与 WBCSD 联合发布）。三大标准虽框架相似（均涵盖系统边界、功能单元等核心要素），但关键环节存在显著差异：

在生命周期范围方面，ISO 14067 强制采用“摇篮到坟墓”全周期；PAS 2050 与 GHG Protocol 允许选择“摇篮到大门”（止于产品出厂）或全周期。在温室气体覆盖方面，ISO 14067 与 PAS 2050 要求核算 63 种气体（含《京都议定书》管控气体）；GHG Protocol 强制核算 CO₂、CH₄、N₂O、SF₆、HFCs 及 PFCs，其余需清单报告。在截断原则方面，PAS 2050 设定量截断值；ISO 14067 与 GHG Protocol 未限定阈值但需说明自设规则。在间接排放处理方面，ISO 14067 侧重回收与使用环节；PAS 2050 明确规定固定资产、运输等要素；GHG Protocol 通过排除条款（如员工交通）实现最精细管控。

自 2008 年，英国、美国等发达国家依托上述标准推行碳标签制度，由龙头企业试点后扩展至日用品领域。相较之下，中国产品碳核算仍处于研究阶段，国家级标准与统一碳标签制度尚未建立，仅存部分地方标准（如上海 DB31/T 1071-2017）及团体标准（如《中国电器电子产品碳足迹评价通则》）。值得关注的是，LCA 方法体系以 ISO 14040（原则框架）与 ISO 14044（技术要求）为基石，而 PAS 2050（2008 年发布，2011 年修订）作为首个专项产品碳足迹标准，为后续 GHG Protocol（2011 年）及 ISO 14067 的制定奠定方法论基础。尽管当前碳标签应用规模有限，但随着气候政策深化，标准化核算体系对企业精准披露产品碳足迹将发挥日益关键的作用。

5.1.2 基于活动的碳足迹标准

活动碳足迹核算指量化特定活动（如会议、赛事、运输、庆典等）在明确时空范围内，由该活动直接或间接引发的温室气体排放与清除的过程。该核算通常涵盖活动筹备、实施及收尾全过程的关键排放源，包括但不限于人员差旅、场地能源消耗、物料采购与消耗、废弃物处理以及相关住宿餐饮服务等环节。依据核算目标与活动特性，主要采用投入产出法（IOA）与生命周期评价法（LCA）。前者适用于评估大规模、标准化活动或活动集群的整体影响，能够有效捕捉供应链中隐含的间接排放；后者则聚焦于特定活动的精细化核算，可系统解析活动生命周期内各阶段的排放贡献，但其对底层活动数据要求高、建模复杂度大，且关键环节数据缺失易显著增加核算结果的不确定性。

表 5.1 系统整合了适用于个人、团体及各类组织的碳足迹核算标准与工具，为量化实体活动衍生的温室气体排放清单提供方法论基础。尽管具体工具存在差异，其核心原则均

源自 IPCC 国家温室气体清单体系与 GHG Protocol 企业核算标准。IPCC 1996 年发布的《国家温室气体清单》系列指南（1996a-c）及 2001 年 GHG Protocol Initiative 推出的《企业核算与报告标准》共同构成基础框架，后续衍生的部门化工具均遵循此原则。核心差异体现在实体边界界定与关键活动识别维度——个人、企业等组织边界特征差异导致标准分化。该表虽未穷尽所有工具（因持续动态更新），但涵盖当前最具公信力的主流框架：

表 5.1 不同组织和团体的碳足迹分析标准和工具

标准或工具针对的对象	标准或工具名称	开发单位
一般组织	ISO14064-1:2006 温室气体第一部分组织层次上对温室气体排放和清除的量化和报告的规范及指南 IS014064-2:2006 温室气体第二部分项目层次上对温室气体减排和清除增加的量化、监测和报告的规范及指南 IS014064-3:2006 温室气体第三部分温室气体声明审定与核查的规范及指南 IS014065:2007 温室气体温室气体审定和核证机构要求 ISO14066:2011 温室气体温室气体检验组和核查组的能力要求	ISO
个人	暂无统一标准（工具如：Carbon Footprint Calculator, WWF Footprint Calculator 等）	不同团体
企业	企业核算与报告标准:修订版，2004	温室气体核算体系促进会
企业	气候领袖温室气体清单核算体系:设计原则，2005	USEPA
企业	简化的温室气体排放计算器 (SCEC)	USEPA
园区	园区气候领袖工具	USEPA 和美国国家园区系统(NPS)
大学	校园碳计算器	洁净空气，清凉星球

学院	气候变化排放计算工具 (ClimateCHECK)	USEPA
地方政府	地方政府操作议定, 2010	加利福尼亚州气候行动登录专案(CCAR), 加利福尼亚州空气资源委员会(CARB), 推进可持续发展的国际非政府组织和地方环境理事会(ICLEI), 气候登记处
其他特殊部门	各种用于服务部门、小办公室机构、美国公共部门和农业部门的核算体系与减排项目	温室气体核算体系促进会
国家	2006 国家温室气体清单指南	IPCC

组织层面的碳足迹核算主要由 ISO 14064 系列标准提供框架, 涵盖组织层级温室气体量化 (ISO 14064-1) 、项目减排监测 (ISO 14064-2) 、声明核查规范 (ISO 14064-3) , 以及配套的审定机构要求 (ISO 14065) 和核查组能力标准 (ISO 14066) 。企业层面则依托三大核心工具: GHG Protocol《企业核算与报告标准》(2004) 奠定核算基础, USEPA《气候领袖温室气体清单核算体系》(2005) 细化设计原则, 辅以面向实操的《简化温室气体排放计算器》(SCEC) 提升应用效率。特定部门标准呈现高度专业化趋势, 教育机构采用《校园碳计算器》, 地方政府遵循《操作议定书》(2010) , 而园区管理则依赖 USEPA 与 NPS 联合开发的《园区气候领袖工具》。相比之下, 个人碳足迹核算领域尚未建立统一标准, 现行工具 (如 Carbon Footprint Calculator) 多由分散团体开发, 方法论体系仍待完善。

企业碳足迹核算以 GHG Protocol 企业标准 (2004) 为核心框架, USEPA 通过《气候领袖温室气体清单核算体系: 设计原则》(2005) 及配套 SCEC 工具细化实施规范。这些工具隶属于 EPA 2002 年启动的"气候领袖计划"—旨在通过政企合作制定气候战略, 后因地方气候项目普及及 EPA 强制报告制度建立, 于 2011 年终止。

5.2 生命周期评价方法与碳足迹

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 作为系统化的环境管理工具, 自 20 世纪 60 年代发展至今已形成完备的方法论框架, 如图 5.4。其核心在于量化产品 (或服务) 从原材料获取、生产、运输、使用直至最终处置 (即"摇篮到坟墓"全生命周期) 的能源与物质输入、环境排放输出及其潜在影响。国际环境毒理与化学学会 (SETAC) 在 1993 年明确定义 LCA 包含三个递进维度: (1) 识别并量化评估对象的资源消耗与排放清单; (2) 分析评估清单条目引发的环境负荷; (3) 诊断评价环境改善路径。该方法适用于产品、流程或活

动系统，覆盖从原料提取、加工分销、使用维护到回收废弃的全过程链条。

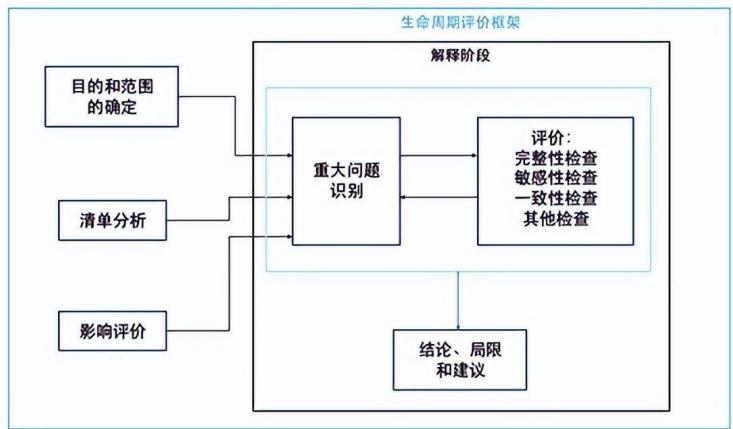


图 5.4 生命周期解释评价方法流程图

国际标准化组织通过 ISO 14040 标准（1997）进一步规范了概念体系：LCA 是对产品系统全生命周期物质能量流及其环境影响的系统评估，其中“产品系统”指实现特定功能的物质-能量过程单元集合。值得注意的是，LCA 框架中的“产品”涵盖实体产品与服务系统，“生命周期”则表征从自然资源开采到最终废弃的连续阶段关联。该方法的核心应用价值体现于产品环境绩效比较，典型案例为 20 世纪纸尿布的环境争议——通过系统量化布质尿布（高水耗）与纸质尿布（原料消耗）的全周期影响，LCA 研究证实纸质尿布的综合环境负荷显著低于传统替代品，为产业决策提供了科学依据。

在 LCA 的多维度环境影响评价中，全球增温潜势（Global Warming Potential, GWP）的专项量化即构成产品碳足迹的核算基础。这意味着碳足迹本质是 LCA 在气候变化维度的单指标应用，二者存在方法论层面的从属关系。

依据 PAS 2050 规范，产品碳足迹核算需遵循系统化的五阶段流程：功能单位确定要求将通用产品描述转化为精确定义的基准计量单元（如“500mL 钠钙玻璃茶杯”或“10000 小时使用周期的手机”），通过规格化参数确保环境绩效可比性；如图 5.5 所示，系统边界划定需优先采纳 ISO 14025 产品类别规则（PCR）或欧盟产品环境足迹（PEFCR）等强制标准，通过生命周期过程图界定原材料获取、制造、运输、使用至废弃处置的关键环节，并明确排除人力投入、消费者交通等非核算项；数据收集阶段需平衡初级数据（现场实测）与次级数据（行业数据库）的应用策略，严格遵循地域、时间及技术代表性三维度筛选原则（参照 PEF 数据质量框架）；碳足迹计算需借助专业 LCA 软件处理多路径物质流耦合及共生产品分配（优先工艺拆分，次选经济价值法），同时纳入废弃物处理排放的特殊核算规则；数据质量验证则通过量化评分与不确定性分析（如蒙特卡洛模拟）确保结果可靠性，并为后续过渡至全流程 LCA 奠定基础。



图 5.5 系统边界的选择

5.2.1 功能单位确定

PAS 2050 将功能单位明确定义为量化产品系统性能的基准计量单元，典型示例如 250 毫升装饮料或 10,000 小时使用时长的手机。ISO 14067 则着重强调功能单位作为输入输出数据的参照基准的核心作用，其设立直接决定了生命周期评价（LCA）结果的可比性——特别是在进行不同系统对比研究时，必须确保所有比较均建立在统一的功能单位基础之上。

以手部干燥系统的碳足迹比较为例，当评估纸巾系统与干手机系统的环境表现时，功能单位应设定为“干燥一双手所需的处理量”，据此可量化各系统实现相同功能所需的资源投入（如纸巾质量或热空气体积）。这种标准化设定使得两个系统的碳排放强度具有直接可比性。然而需注意的是，功能单位的设定需兼顾研究目的与用户认知需求：虽然技术层面采用“干燥一双手”作为功能单位有利于系统比较，但商业传播时消费者更关注的是完整产品单元（如单台干手机或整包纸巾）的全生命周期碳足迹。

在实际应用中，功能单位的设定原则存在显著差异：商业导向的场景通常采用市场交易单位（如单瓶饮料而非 100 毫升计量），这与 LCA 研究要求的严格可比性存在张力。此外，对于涉及使用阶段的产品（如耐用电器），功能单位必须整合使用时长参数；服务类产品则可采用合约周期作为功能单位（如 1 年宽带服务）。表 5.2 展示了典型产品与服务功能单位的实际应用案例。

表 5.2 常见产品及服务的功能单位示例

产品类型	产品名	功能单位
一次性产品	面包	一袋 500g 的面包
	饮料	一瓶 500ml 的饮料
耐久产品	手机	一部规格为 xxx 的手机，使用时长为 10000 小时
	汽车	一部规格为 xxx 的汽车，行驶里程为 15 万公里
服务	高铁	北京到上海的 xxx 次高铁
	通讯	1 年的 1G 字节宽带服务
	酒店	入住一晚标准间

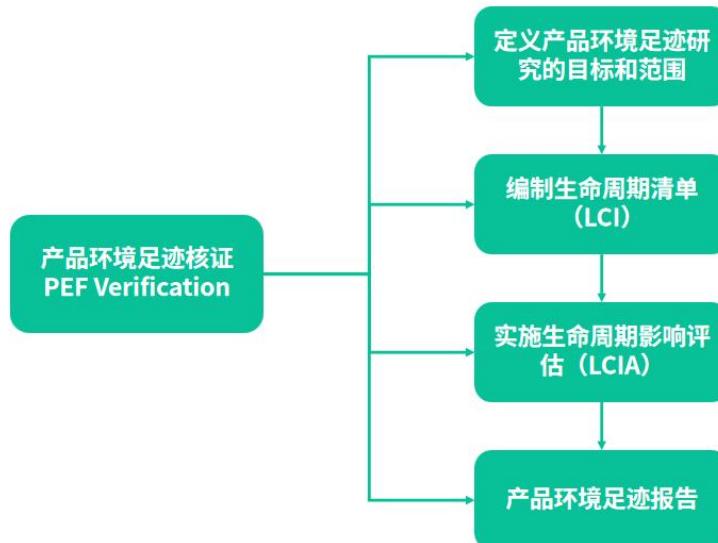
5.2.2 系统边界确定



来源：根据公开资料整理

图 5.6 欧盟 PEF 发展历程

产品生命周期系统边界的划定对碳排放核算结果具有决定性影响，因此必须在方法学层面予以严谨界定。依据 PAS 2050 的原则，应首先检索并优先采纳 ISO 14025 框架下针对该产品类别已发布的种类规则 (PCR) 所规定的系统边界；若欧盟产品环境足迹 (PEF) 等强制性规则已为该类产品制定了专门的产品环境足迹种类规则 (PEFCR)，如图 5.6，则必须遵循其给定的边界范围。PEF 作为当前最为详尽的 LCA 标准与认证体系，凭借对供应链信息的深度追溯，其影响力已延伸至欧盟之外。以《欧盟电池与废电池法规》草案为例，自 2024 年起出口欧盟的电池将强制按照 PEF 方法披露碳足迹，未来该要求极可能扩展至电子、纺织、光伏等领域，故无论企业位于何处，只要产品输欧，即需依 PEF 划定边界，如图 5.7 欧盟 PEF 研究方法。

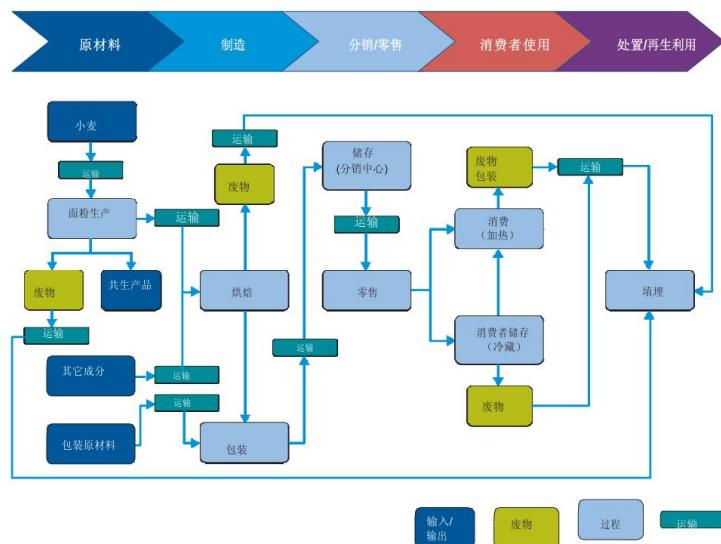


来源：据公开资料整理

图 5.7 欧盟 PEF 研究方法

在边界范围的具体内容上，PAS 2050 提供了明确的取舍准则，按图 5.8 产品生命

周期完整步骤划分：原材料获取阶段所有与物料转化相关的能源与直接排放均应纳入，鉴于初级数据难以获取，实践中通常采用次级数据集；能源供应环节的上游排放亦须计入，同样多依赖次级数据；资产性商品——如生产用设备与厂房——在其建造阶段产生的排放被排除在外。制造与服务提供阶段的所有排放，包括原型试制所产生的排放，应依据“原型活动排放分配给所有最终产品及共生产品”的规则全部纳入。辅助设施（工厂、仓库、中央配给中心、办公室及零售店等）运行导致的温室气体排放亦在边界之内。运输与储存环节产生的排放须完整覆盖，其中冷链运输及储存还需额外考虑冷媒泄漏。若采用“摇篮到大门”视角，则使用阶段及后续废弃处置阶段的排放可整体排除；若采用“摇篮到坟墓”视角，则使用阶段及废弃处置阶段的排放必须计入。此外，PAS 2050 明确将人力投入、消费者往返零售地点、员工通勤以及提供运输服务的牲畜所产生的排放排除在外。



来源：《PAS 2050 规范》使用指南

图 5.8 产品生命周期完整步骤示例图

在组织层面，系统边界的设定需同时考虑组织边界、运营边界与时间边界。边界确定的决策结构如图 5.9 所示，组织边界的确定首先取决于分析对象是私有部门还是公共部门：私有部门可基于普通股方法或控制方法（运营控制、财务控制、联合控制），公共部门则仅能采用控制方法。对于地方政府，推荐采用运营控制法；当运营活动完全整合于财务项目时，则宜采用财务控制法；若存在联合财务控制，则需通过合同分析判定适用联合控制法。合并、分立或校区整合等情形可能导致数据收集困难，此时应在组织边界定义阶段即评估数据可得性并作出一致性选择。

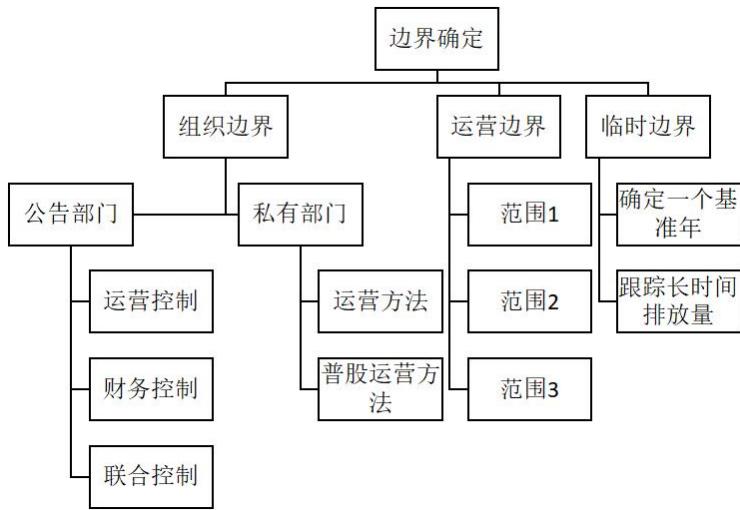


图 5.9 边界确定的决策层次

运营边界的设定旨在避免重复计算，温室气体核算体系将其划分为范围 1（直接排放）、范围 2（间接排放，源自外购电力、蒸汽、冷却水等能源）以及范围 3（可选的上下游间接排放），如图 5.10 所示。范围 1 包括固定源与移动源燃烧、工艺过程排放及逸散排放，例如水泥熟料煅烧或铝电解过程中的 CO₂ 释放、制冷剂泄漏等。范围 2 主要涉及外购电力的间接排放，其排放因子可依据区域电网数据（如 USEPA eGRID）或公用事业公司提供的特定因子计算。范围 3 为自愿核算的上游及下游排放，涵盖原料获取、废弃物管理、员工通勤、商务旅行、输配电损耗等；尽管数据不确定性较高，但最新版温室气体核算体系已引入 LCA 方法并发布范围 3 指南，以提升评估的可操作性与一致性。

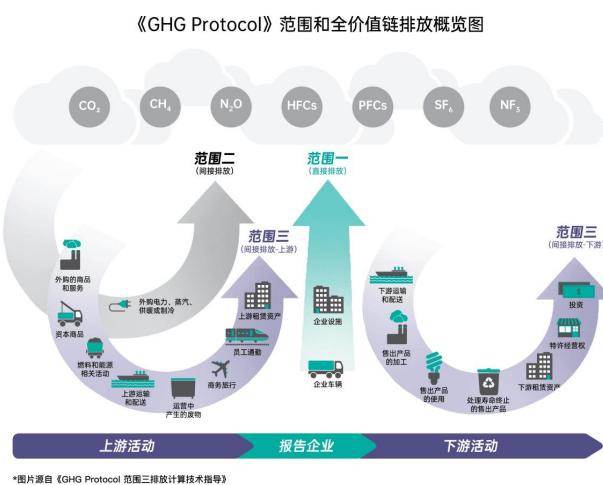


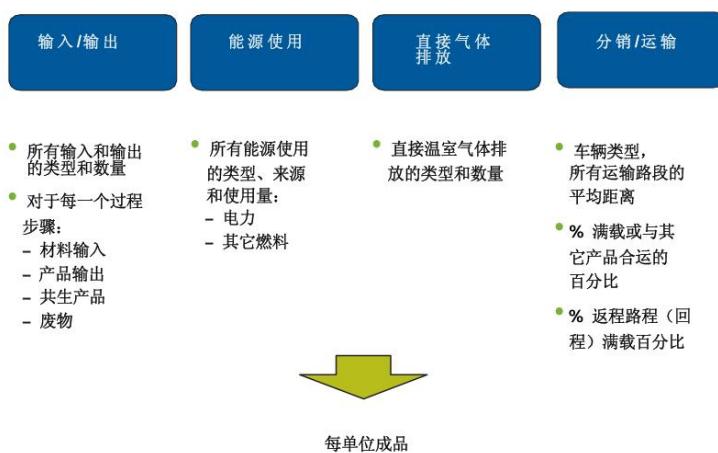
图 5.10 系统边界示意图-全价值链排放图谱

最后，时间边界的确定依赖于基准年的选取。基准年既是追踪减排进展的参照点，也是减排目标设定的基础。国际实践多以 1990 年为基准年，但机构在缺乏早期数据的情况下，应基于数据可得性、项目需求及既有减排行动综合确定基准年，并保持后续核算方法的

一致性。

5.2.3 活动数据的收集

明确碳核算的系统边界后，理论上只需将图中每一工序或单元过程的输入与输出对应的碳排放数据完整输入，即可核算产品碳足迹。然而，排放数据的获取在实践层面远比概念复杂，产品生命周期活动数据来源如图 5.11 所示，产品自原材料开采至废弃处置的链条短则三四层、长则数十层，若对所有环节均采集一手数据，效率极低。例如，核算一罐饮料的碳足迹时，为追溯铝罐的排放，需依次访问制罐厂、铝锭厂直至铝矿山，显然不具备可操作性。因此，正式收集数据之前，必须先区分两类活动水平数据：初级活动水平数据（primary data）与次级活动水平数据（secondary data）。



来源：《PAS 2050 规范》使用指南

图 5.11 产品生命周期活动数据来源图

初级活动水平数据，又称一级数据或现场数据，仅指由组织自身拥有、运行或控制的过程直接产生的数据，具有产品-工厂-年份的唯一对应关系。以饮料罐为例，其灌装工厂当年度因蒸汽、电力及制冷剂泄漏所产生的温室气体排放，即构成该工厂对该产品提供的初级数据。相反，次级活动水平数据（二级数据或背景数据）泛指任何非现场直接测得的信息，通常表现为政府、行业或第三方数据库中的统计均值、文献值或估计值。中国目前尚无官方认可的国家数据库，全球范围内最常被引用的是瑞士 Ecoinvent 中心发布的综合数据库。由于次级数据往往基于若干年前的行业平均，其精度显著低于初级数据。例如，数据库可能给出“每吨不锈钢排放 2.5 t CO₂”的数值，该值实为中国若干不锈钢企业 N 年前的加权平均，与由实际供应商提供的、反映当年具体工艺的现场数据相比，偏差不容忽视。

因此，为提高碳足迹结果的准确度，原则应优先采用初级数据；但为保证项目在时间与资源上的可执行性，又必须对数据来源进行策略性取舍。PAS 2050 提出 10% 贡献度规则：若某上游供应商的排放贡献超过产品总足迹的 10%，则该供应商须提供现场数据，并依此规则继续向上游追溯。在实务中，由于供应链可控性有限，除企业自身生产阶段普遍使用初级数据外，原材料数据大多退而求其次采用次级数据；能够延伸至一级供应商已属少

数，更遑论追踪至矿山或农场层面。此外，因高质量物料通常伴随高能耗加工（如铝锭 vs 铝矿），物料质量占比可间接反映排放权重。例：某原料占产品总重 15%，即使无精确排放数据，也可初步判定其为关键供应商，为简化判断，多数企业以物料质量而非预估排放量估算贡献度，且当供应商拒绝配合时，只能以次级数据替代。对于汽车、手机、电脑等零部件高度分散的产品，若严格遵循 10 % 规则，需调查上千家供应商，短期内难以实现，因此需要分阶段实施：先覆盖关键供应商，再逐步扩展。按照 LCA 的完整性要求，所有原材料原则上应追溯至自然资源开采阶段，唯有电力因其不可物理溯源的特性，可直接采用以国家为单位的次级排放因子。

数据来源确定后，即进入正式的数据收集环节，如图 5.12 所示。通常以单元过程为最小单元，依据质量平衡原理，穷举该过程单位时间内的所有物质与能量输入、输出。一个单元过程往往对应一家独立工厂或车间，只需界定其组织边界并汇总边界内的物料、能源、产品及废物数据即可；若多条产品线共用同一车间且数据无法拆分，可将该车间整体纳入核算。数据可源于计量系统（水、电、气表读数）、财务报表（产量、废料清运量）等，优先采用最近完整年度的数据；若年度数据缺失，则使用连续稳定生产的最近数月数据。必须确保输入与输出数据对等，并对每一原材料补充运输距离及运输方式，以覆盖运输环节的排放。

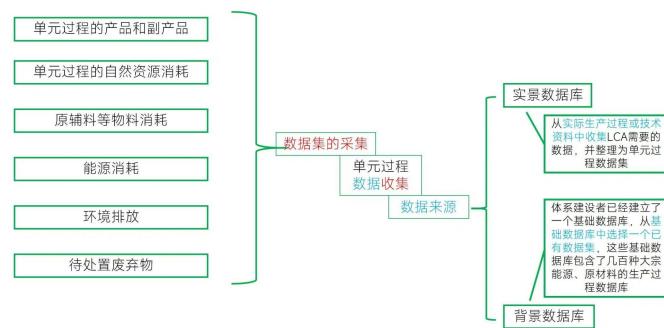


图 5.12 单元过程数据收集流程图

次级数据的确定则表现为排放因子的选择。选择时应同时权衡地域代表性、时间代表性、技术代表性与数据权威性四个维度。以钢材为例，若数据库提供欧盟平均、中国平均及所在省份平均三套因子，则优先顺序为省份、国家、欧盟；若存在长流程与短流程炼钢两套技术因子，应匹配实际工艺；年代越近、技术对应越精确、获官方或利益相关方认可程度越高的因子越应被采纳。若产品拟出口欧盟，则必须遵循 PEF 要求采用 Ecoinvent 等指定数据库。

在混合使用初级与次级数据时，可采用加权平均策略。例如，某原料由两家供应商提供，一家积极配合提供初级数据，另一家拒绝，则按采购比例加权合并两类数据；若小型供应商数量过多且累计占比不超过 20 %，可用其他供应商的初级数据代替，以兼顾精度与

可操作性。

5.3 碳足迹计算与数据质量

在获取全部初级数据并完成次级数据的甄选后，项目即转入碳排放计算阶段，碳足迹计算步骤见图 5.13。由于产品碳足迹的过程图呈网络状而非线性链，每个单元过程往往同时关联多条上游与下游路径，且常伴随共生产品，导致手工演算耗时巨大、易出差错，因此业界普遍采用专业 LCA 软件实现自动化求解。软件操作流程始于功能单位的录入，随后需在图形界面中绘制过程图并依照既定边界构建完整的 LCA 数据模型；该模型一旦确立，便可按过程逐一加载已整理的初级数据，并在软件内置或绑定的数据库中直接调用对应的次级排放因子。需要指出的是，部分数据库仅与其专属软件捆绑销售，并不单独授权数据文件，若需引用此类数据库，则必须在相应软件环境内完成全部足迹计算。

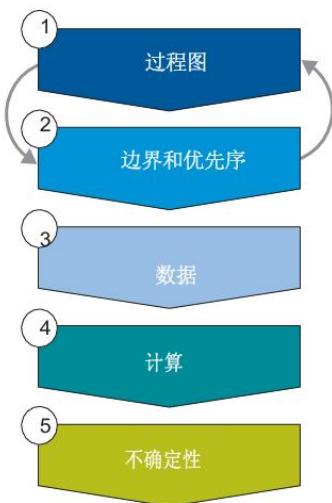


图 5.13 计量碳足迹的五个步骤

5.3.1 碳足迹计算

在单元过程的清单编制阶段，若同一工艺同时产出多种功能产品，即出现共生产品情形，便需对总温室气体排放进行分配。以饮料罐体制造为例，当设备在一次运行中同时生产 A 型与 B 型罐体，而仅 A 型罐体被纳入研究目标时，必须将工艺排放合理分摊。PAS 2050 提出的处理顺序为：首先，通过工艺细分消除分配需求，即尝试将原单元过程拆分为仅含单一输出的子过程，如验证生产线是否可区分为专产 A 罐与专产 B 罐的独立子设备；若拆分可行，则无需分配。然而，若工艺存在物料耦合（例如 B 罐生产需利用 A 罐的边角料），拆分不可行，则采用经济价值法进行分配：以各共生产品的市场价值为权重，将总排放按比例划分。举例而言，若某批次产出 100 只 A 罐（单价 10 元）和 50 只 B 罐（单价 5 元），总排放 100 kg CO₂ e，则 A 罐分得 80 kg（单罐 0.8 kg），B 罐分得 20 kg（单罐 0.4 kg）。实际操作中，仅需在 LCA 软件中设定“按经济价值分配”规则，系统即可自动完成上述计算。

此外，单元过程输出的废弃物亦须纳入系统边界，此处废弃物特指生产环节产生的废水/废气/固废（如工厂废水），与 5.2.2 节排除的消费者行为排放无关。无论废水、废气或固废，其后续处理过程产生的排放均应计入；废弃物自身在处理环节释放的温室气体亦不可忽略。若废弃物含化石碳且处理方式为焚烧，则化石碳燃烧生成的 CO₂ 必须计入；若含生物质碳且处理方式为填埋，由此产生的 CH₄ 亦应纳入，除非 CH₄ 被收集并焚烧处理。与组织层面碳核算一致，生物质燃烧直接释放的 CO₂ 不纳入产品碳足迹。

5.3.2 数据质量评分与关键参数验证

表 5.3 PEF 中关于次级数据质量的量化分析

质量等级	质量评价	时间代表性	技术代表性	地域代表性
		数据集在多大程度上反映了有关数据时间/年限（给定年份）的系统特定条件	数据集在多大程度上反映了有关技术（技术特性，包括操作条件）的真实性、相关性	数据集反映真实地理位置（给定的位置/地点、地区、国家、市场等）相关的程度
卓越	1	1 年内更新的	技术与实际产品完全相同	产品所在国家
非常好	2	2 年内更新的	技术包含在产品范围内 的技术组合中	产品所在区域（如大洲）
良好	3	3 年内更新的	技术部分包含在产品范 围内	产品所在区域之 一
一般	4	更新时间大于 3 年	技术与实际产品技术类 似	与以上地理区域 类似的区域
差	5	无时间记录	无法证明技术与产品的 相关性	完全不同的区域

数据质量构成了产品碳足迹可信度的根基，而次级数据在实践中的普遍使用使这一根基面临显著分化。一方面，企业可以投入大量资源逐级追溯供应链，以现场初级数据夯实结果；另一方面，也可完全依赖数据库平均值，在不足一天内完成核算。两种路径所得碳足迹虽同名，却可能在数值与政策含义上相去甚远。我国现行法规尚未对产品级碳核算设定强制性技术规范，PAS 2050 提出的“上游贡献 $\geq 10\%$ 即需现场数据”原则在供应链协同不足的背景下亦难以落地。当前大多数服务机构在无特殊客户需求时，仅对自有生产环节采用现场数据，原材料一律调用次级平均值，核算结果虽简洁，却因未能穿透上游而无法将供应链减排绩效纳入产品足迹，最终报告易于沦为应付利益相关方的形式文件。因此，即便上游数据采集存在商业壁垒，亦应将其视为提升数据质量的核心抓手并持续推进。

除来源差异外，初级与次级数据本身亦存在显著质量梯度。次级数据需在时间、地域与技术代表性维度上接受筛选，其差异可通过量化评分加以表征：对不同维度赋予权重并聚合为产品层级的综合数据质量分数，该分数可随数据迭代而动态更新，为持续改进提供可量化依据。表 5.3 所示的 PEF 次级数据质量框架即为此类方法的典型示范。

基于 LCA 的产品碳足迹核算方法对专业门槛要求高，不利于快速评估某个产品的实际碳排放情况。为了解决这个问题，一些组织开发出特定行业的碳足迹简化算法，简化碳足迹计算示例如图 5.14 所示。碳足迹简化算法是在严格生命周期评价（LCA）高专业门槛与快速评估需求之间折衷而生的行业级解决方案。其基本思路是将 LCA 过程图中的单元过程抽象为独立排放源，直接沿用组织层面“活动数据 × 排放因子”的核算逻辑，从而免除了对每一输入、输出逐项进行质量平衡的繁复步骤；共生产品的环境负荷则依据行业既定规范预先设定分配比例，无需实时建模。法国光伏组件简化碳排放评估（ECS）与中国《乘用车生命周期碳核算技术规范》均为该思路的典型范例。由于计算流程与组织级碳核算高度同构，企业可在不依赖专业 LCA 软件的情况下，通过简易表单完成演算，尤其适用于上游供应链数据缺失或合作意愿不足的场景。尽管简化算法在边界完整性、技术差异刻画和动态分配等方面与完整 LCA 存在系统偏差，其直观、易操作、低成本的特性在方法普及初期显著提升了企业参与度和数据收集的接受度，可为后续逐步过渡到高分辨率、全过程的精细 LCA 奠定认知与数据基础。

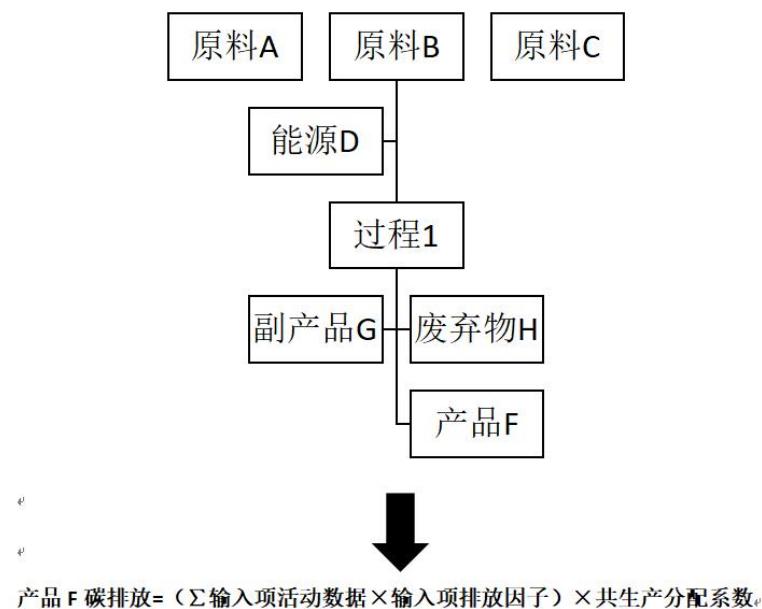


图 5.14 简化碳足迹计算示例