



从传统方法到数字平台：碳足迹核算工具的技术进步与应用进展

刘含笑^{1, 2, 3, 4, ✉}, 叶鹏涛², 冉初萌⁵, 于立元¹, 崔盈¹, 刘忠², 刘美玲¹, 孙立¹

1. 浙江菲达环保科技股份有限公司, 诸暨 311800; 2. 华北电力大学, 北京 102206; 3. 浙江省环保集团生态环保研究院有限公司, 杭州 310030; 4. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074; 5. 国家能源集团泰州发电有限公司, 泰州 221008

摘要 在全球应对气候变化的大背景下, 碳足迹核算工具及其数字化平台的重要性日益凸显。本研究梳理了碳足迹的定义及分类, 5 种碳足迹计算方法的主要特点、优势与局限性, 提出了针对不同用户的选择建议; 探讨了信息技术在数字化平台的应用潜力, 总结了碳足迹核算工具和平台发展过程中面临的主要挑战, 提出了相关建议。自 90 年代碳足迹概念被提出开始, 以生命周期分析 (LCA) 方法为核心理论基础, 碳足迹核算工具经历了手动计算加电子表格、SimaPro 等系统化软件加数据库、大数据和云技术支持下的平台化等主要发展阶段, 自动化、标准化和国际化水平不断提高。当前, 碳足迹核算工具依然面临国际标准本地化及标准覆盖面不足、使用成本高且操作复杂、数据获取困难且质量参差不齐、社会层面对碳足迹和碳减排认知不足等主要挑战。为此, 建议在标准与规范层面进一步提高标准系统的本土化适应力和国际标准化接轨水平; 在技术层面充分利用人工智能、大数据、物联网和区块链技术, 建设本土化、标准化、可共享的数据库, 开发易用且成本可控的核算工具, 提升核算精确度和透明度; 在社会认知层面通过教育、公共信息平台、社交媒体、企业激励和政策引导, 提升社会共识度, 推动碳足迹核算工具的更广泛化应用。

关键词 碳足迹; 碳足迹核算工具; 数字平台

随着全球气候条件不断恶化, 各国政府纷纷制定碳减排目标, 在解决碳排放问题上逐步达成了国际共识^[1-3], 我国对此也作出了积极的回应。2020 年 9 月, 我国在第 75 届联合国大会上提出了双碳目标: 中国力争于 2030 年前 CO₂ 排放达到峰值、2060 年前实现碳中和^[4-7]; 2021 年 10 月, 国务院印发的《2030 年前碳达峰行动方案》^[8] 指出: 要将碳达峰贯穿于经济社会发展全过程和各方面, 重点实施“碳达峰十大行动”; 2023 年 11 月, 《国家发展改革委等部门关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》^[9] 提出要推动建立符合国情实际的产品碳足迹管理体系、完善重点产品碳足迹核算方法规则 and 标准体系、建立产品碳足迹背景数据库、推进产品碳标识认证制度建设、拓展和丰富应用场景等要求; 2024 年 5 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》^[10] 紧扣碳达峰碳中和目标任务, 分阶段明确碳足迹管理体系的建设目标。在此背景下, 建设符合我国国情的碳足迹管理体系, 不仅仅是在国际标准上进行深化, 更大的意义还在于对内在供应端和消费端促进减碳, 实现全社会流程低碳制造, 对外突破国际贸易壁垒提升我国产品的国际竞争力, 其中, 科学适用的碳足迹计算工具是重要的支撑手段, 受到了广泛关注。

碳足迹的准确核算是辅助双碳目标实现的有效手段: 有助于精准刻画、清楚回答“碳从何而来”, 支撑全社会构建以低碳为理念的消费格局, 协助构建未来低碳生产工业体系, 打破绿色贸易壁垒^[11]。精确计算碳足迹不仅能帮我们理解日常生活或工作对环境造成的影响, 而且还是制定有效减排措施的基础, DIANA 等^[12] 系统地筛选了 Web of Science 核心馆藏和 Scopus 中的 6990 条记录, 综合了食品、住房、交通和其他消费领域的减排潜力, 并在 61 个具有积极缓解潜力的消费方案中进行了总结和介绍, 建立了以 CO₂ 当量/人均

收稿日期: 2024-09-18 录用日期: 2024-11-30

基金项目: 浙江省“尖兵”计划资助项目 (2022C03030); 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3701501)

第一作者: 刘含笑 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为大气污染治理及双碳技术研究, gutounan@163.com
✉通信作者

/年吨数衡量的具有高减排潜力的消费方案,利用碳足迹分析,为政策制定者提供了关于消费行为改变对气候变化缓解潜力的量化评估;碳足迹也可以用来引导消费者的行为,TAMAR 等^[13]构建了 2 种跨越运输模式的出行场景,并提出了行为假设,使用碳足迹分析来评估食品共享平台对减少食物浪费和环境影响的作用,表明共享经济可能为提高资源效率和减少食物浪费提供强有力的手段,为消费者提供了更环保的消费行为;碳足迹分析可以帮助城市和区域制定更可持续的发展规划,CHEN 等^[14]回顾已发表的与城市碳核算相关的研究和协议,引用网络分析,确定并分析了该领域被引用最多的文章,从 3 个角度说明了城市级碳核算的发展,综述了城市层面的碳核算方法,包括碳足迹分析在城市规划和管理中的应用,揭示了研究方法和会计协议之间的关系,此外,还提供了相关组织、协议和项目的时间表,以展示城市碳核算在实践中的应用,从消费角度结合经济系统分析的新兴模型正在引领该领域的新趋势。这些碳足迹研究为政策制定者和消费者提供了量化评估和指导,促进低碳消费行为和可持续发展规划,从而实现减排目标和应对气候变化的挑战。碳足迹核算工具和数字化平台的发展与应用同样在提升我们对碳排放的准确度和处理效率方面起着至关重要的作用。近年来,数字平台开始在国内一些企业应用。某钢铁企业打造全球首个实现大规模实时碳量化核算及碳标签管理的系统,可针对每日近 100 余万条的海量生产现场数据实现自动采集、清洗和校验分析,并通过调用系统内置的全覆盖钢铁生产制造工艺流程自动搭建的量化分析模型,最终实现碳数据的自动运算、及时输出符合国际规范的产品碳足迹量化计算结果,为企业出产的每一批次钢铁产品实时打上绿色标识的碳标签,从而帮助某钢铁企业主动进行产品碳足迹数据信息管理,能够单月计算 30 余万个产品;某大型能源集团企业搭建碳管理平台,实现企业碳资产信息的常态化归集和精准化的数字化管理,优化碳资产的配置以最大化资产价值,帮助企业在全国碳交易市场制定有效的交易策略,最大化交易收益;某大型石油化工集团进行产品生命周期碳足迹分析,对润滑油脂产品系列碳足迹进行量化和日常管理,支持产品开展绿色低碳设计,提供工艺低碳改进路径,为供应链企业搭建碳足迹核算和披露平台,支撑企业进行供应链碳足迹管理,从市场端推动石油化工产品碳足迹核算及应用,为国内石油化工行业碳足迹核算管理树立标杆。在全球推进双碳目标的背景下,准确量化碳足迹的需求日益增加,碳足迹核算工具与平台的发展备受关注。

碳足迹核算技术的发展经历了从传统方法计算到智能数字平台的演变,然而,关于其发展过程及各个方法或工具的相关文献研究仍较为稀缺。本研究旨在系统梳理碳足迹计算方法和工具的发展历程及其特点,同时对比其优势与不足,并对未来发展方向进行展望。首先阐述了碳足迹的概念与分类,分析了当前广受关注的组织碳足迹和产品碳足迹。这 2 个类别在实践中具有不同的应用场景和核算需求,分别反映了组织整体运营及单个产品生命周期对环境的影响。其次,探讨了常见的碳足迹核算方法,重点对当下应用最广泛的生命周期评价法的发展进行了详细说明;再次,介绍了碳足迹计算的工具和软件,并对其进行了分析和讨论,虽然这些核算方法与工具都推动了碳足迹核算的发展,但它们的适用范围和优缺点各有不同,针对不同用户群体和应用情境提供了选择建议。最后,针对碳足迹核算工具发展过程中数据质量、标准化、用户接受度和技术兼容性等挑战进行了分析,提出了若干建议以供参考。

1 碳足迹的概念和核算方法

1.1 碳足迹的定义和分类

20 世纪 60 年代,随着工业化进程的加快,环境问题日益突出,特别是空气污染、水污染和生态破坏等问题引起了广泛关注。20 世纪 70 年代是全球环境意识觉醒的重要阶段。1972 年,联合国在斯德哥尔摩召开了第一次人类环境会议,标志着全球环境保护意识的觉醒。虽然当时还没有明确的“碳足迹”概念,但这为后来的环境评估方法奠定了基础。随着工业化的加速,环境问题开始引起全球关注。这一时期的研究主要集中在污染物排放和环境影响评估上,为后来的碳足迹概念奠定了基础。1992 年 REES^[15]提出生态足迹概念,碳足迹的概念来源于此。21 世纪初,碳足迹概念的形成,用于量化个人、企业或产品的温室气体排放,随着全球气候变化问题的加剧,温室气体排放成为关注的焦点。

碳足迹表征考虑了全球变暖潜势(global warming potential, GWP)的温室气体排放量,通常以二氧化碳当量(CO_2e)来衡量,它是评估气候变化影响的一项重要指标,反映了人类活动对环境的直接或间接影响。温室气体还包括甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF_6)、三氟化氮(NF_3)等。表 1 是部分温室气体 100 年内的 GWP (GWP100)。

在量化碳足迹时可将温室气体折算成二氧化碳当量，如式 (1)^[16] 所示。

$$C = \sum Q_i \times m_i \quad (1)$$

式中： C 表示 CO_2e ，kg； m_i 表示温室气体 i 生命周期清单的结果，kg； Q_i 表示温室气体 i 的 GWP100。

碳足迹可以根据不同的分类标准进行划分。按照分析的尺度，碳足迹可以分为国家碳足迹、城市碳足迹、组织碳足迹、企业碳足迹、家庭碳足迹、产品碳足迹和个人碳足迹^[17]。这些分类涵盖了从宏观到微观各个层面，使得碳足迹的计算能够适用于不同对象和需求。按照 ISO/TS 14067：

2013《温室气体 产品碳足迹 量化和交流的要求和指南》（greenhouse gases—carbon footprint of products—requirements and guidelines for quantification and communication）3.1.1.1 的定义，产品碳足迹是对产品系统开展基于气候变化这一影响类型的生命周期评价，是温室气体排放和削减之和，以 CO_2e 来表征^[18]。根据温室气体排放的来源和性质，碳足迹可以分为直接碳足迹和间接碳足迹。直接碳足迹主要指实体（如个人、组织或产品）直接排放的温室气体量，比如家中取暖设备的碳排放；而间接碳足迹则包括了生命周期中与生产、使用和废弃处理相关的温室气体排放，例如产品的运输和制造过程中产生的排放。

碳足迹管理的对象可以分为“组织碳”和“产品碳”，目前大家对组织碳关注更多，如地方政府、企业提出的降低碳排放目标。当前阶段，企业针对产品碳足迹的管理，更多是为了应对国际贸易壁垒，提升产品的国际竞争力^[19]。关于“组织碳”和“产品碳”，二者在核算对象、核算范围和应用场景都有区别。组织碳足迹是指一个组织（如公司、机构、政府部门等）在其运营过程中直接或间接产生的温室气体排放总量。它通常包括办公、生产、运输、能源消耗等各个方面的排放。其核算范围包括以下内容。

1）范围 1（直接排放）：来自组织自身拥有或控制的源头的直接排放，例如燃烧化石燃料、公司车辆的排放等。

2）范围 2（间接排放）：来自购买的电力、热力、蒸汽和冷却的间接排放。

3）范围 3（其他间接排放）：来自组织活动但不由组织直接控制的其他间接排放，例如员工通勤、废弃物处理、供应链排放等。

其可以帮助组织了解其运营对环境的影响、制定和实施减排策略、提高透明度，满足利益相关者和监管要求。而产品碳足迹是指一个产品在其整个生命周期内（从原材料获取、生产、运输、使用到最终处置）所产生的温室气体排放总量。它关注的是单个产品的环境影响。其核算范围包括。

1）原材料获取（包括原材料的开采、生产和运输）。

2）生产制造（包括产品的制造过程中的能源消耗和排放）。

3）运输和分销（包括产品从生产地到市场的运输过程中的排放）。

4）使用阶段（包括产品在使用过程中产生的排放）。

5）废弃和回收（包括产品使用寿命结束后的处理和回收过程中的排放）。

其可以帮助企业和消费者了解产品的环境影响、促进产品设计和生产过程的改进，以减少碳排放、支持绿色营销和可持续消费。

碳足迹的概念发展至今，目前还没有统一的定义，不同国家的学者和机构的看法不尽相同^[20]，大多数看法的争议点在于^[21]。

1）评估的对象，是针对产品，还是针对活动（个人、团体、组织、公司、政府、国家等）。

2）评估的边界，需不需要包括原料开采、运输等全生命周期过程；核算的内容，只算 CO_2 排放量，或者是所有温室气体的 CO_2 排放当量。

3）是算直接排，还是算直接、间接排放的累计总量。

表 1 温室气体 100 年内全球变暖潜势^[16]

Table 1 Global warming potential of greenhouse gases over a 100-year horizon

温室气体名称	化学式	全球变暖潜势（GWP100）
二氧化碳	CO_2	1
甲烷	CH_4	27.9
氧化亚氮	N_2O	273
氢氟碳化物	HFCs	4.84~14 600
全氟碳化物	PFCs	7 380~12 400
六氟化硫	SF_6	25 200
三氟化氮	NF_3	17 400

本研究认为：碳足迹是衡量人类活动中释放的或是在产品或服务的整个生命周期中累计直接和间接排放的 CO_2 和其它温室气体的总量。针对不同的核算对象，碳足迹的核算边界也应该做出相应的调整。针对产品时，核算边界要包括原料开采、运输等全生命周期过程；针对活动时，主要核算在某个时间区间内的累计的直接和间接排放的 CO_2 和其它温室气体的总量；同一对象的碳足迹才有相比较的必要，产品与产品之间、活动与活动之间的碳足迹才有可比性。

1.2 碳足迹的核算方法

目前碳足迹的核算方法主要有：生命周期评价法（life cycle assessment, LCA）、投入产出法（input-output, I-O）、混合生命周期评价（hybrid LCA, HLCA）、通过所使用的能源矿物燃料排放量计算（IPCC）和 Kaya 碳排放恒等式。

1) 生命周期评价法（LCA）。20 世纪 60 年代，LCA 的概念开始萌芽，最初的研究集中在能源分析上，可口可乐公司在 1970 年进行的饮料容器生命周期分析是 LCA 早期应用的一个著名案例。20 世纪 70 年代，LCA 的应用开始扩展到其他环境影响领域，1973 年，第一个 LCA 计算机程序由 MRI 客户资助^[22]。20 世纪 80 年代，LCA 方法学逐渐成熟，SETAC 在这一过程中发挥了重要作用，SETAC 的工作为 LCA 的标准化奠定了基础^[23]。20 世纪 90 年代，ISO 14040 系列标准的发布标志着 LCA 的国际标准化，这些标准为 LCA 提供了系统的框架和指南，生命周期分析方法在这一时期得到发展，用于评估产品和服务的环境影响。LCA 为碳足迹的测量提供了方法论基础，帮助识别产品生命周期中各阶段的碳排放。21 世纪 00 年代，LCA 的应用范围扩大到了产品设计、政策制定和企业战略等领域，ISO 14044 标准的发布进一步细化了 LCA 的要求。

发展至今，LCA 是一种自下而上的核算方法，是评价一个产品、服务、过程或活动在其整个生命周期内所投入及产出对环境形成的和潜在的影响的方法，是一种从“摇篮”到“坟墓”的计算方法^[24]。LCA 的结构图如图 1 所示^[25]。

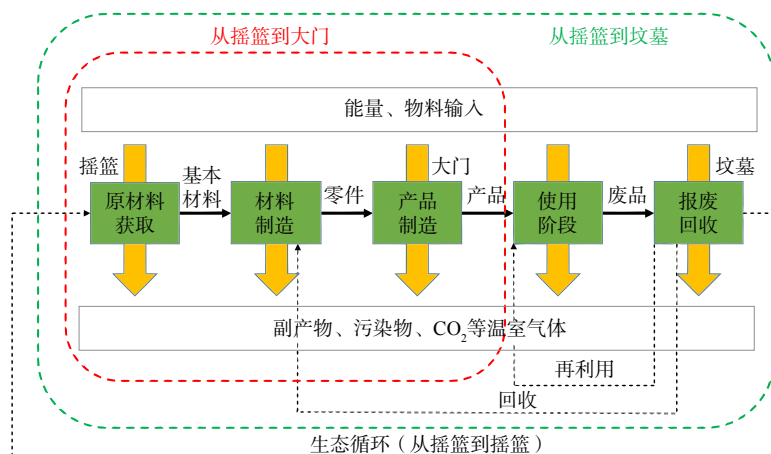


图 1 全生命周期评价结构图

Fig. 1 LCA structure diagram

根据 ISO 14044 标准对 LCA 的规范，LCA 包括：目标与范围定义（goal and scope definition, G&S）、生命周期清单分析（life cycle inventory, LCI）、生命周期影响评价（life cycle impact assessment, LCIA）以及生命周期结果解释^[26]。其中，G&S 阶段指定了研究的总体目标、系统边界、数据源以及功能单元；LCI 包括对所有环境投入和产出的详细描述，而 LCIA 通过使用环境指标量化所有环境影响的相对程度^[27]。

LCA 适合于产品、组织、企业、行业等中微观系统的碳足迹评估，为行业生产流程决策、企业产品开发、制造流程设计和公众消费决策提供参考信息^[28]，能够量化和全面地评价产品生命周期过程所造成的各种环境影响，帮助人们发现并避免环境问题在不同生命周期阶段和不同环境影响类型之间的转移^[29]，并且计算结果准确和过程详细也是其一大优点。但是，这意味着需要大量精确的数据，并且由于该方法允许在无法获

知原始数据的情况下采用次级数据，因此可能影响到碳足迹分析结果的可信度^[30]；最后，LCA 在实际应用的时候存在大量的假设和折中方案而造成结果差异^[31]，未考虑到社会或经济因素而导致结果无法反映产品、活动或服务等的可持续性^[32]，系统边界完整性问题导致截断误差^[33]，核算结果易受时间因素影响^[34]等问题也需要考虑。

20 世纪 00 年代，随着碳足迹概念的普及，各种测量标准和工具相继出现。国际标准化组织（ISO）发布了 ISO 14067 标准，用于规范产品碳足迹的测量和报告。与此同时，各种碳足迹计算工具和数据库（如 Ecoinvent、GHG Protocol）被开发和应用。对于产品碳足迹，国际评估标准主要有 3 个^[35]：《产品与服务生命周期温室气体排放的评价规范》（PAS 2050）、《产品生命周期核算与报告标准》（GHG Protocol）和《产品碳足迹量化与交流的要求与指导技术规范》（ISO 14067）。如图 2 所示，展现了 3 个国际标准各自的演变历程。2006 年，国际标准化组织推出了 ISO 14040 与 ISO 14044 这 2 项标准，在此基础上，英国标准协会于 2008 年引入了 PAS 2050 及其指南，该标准在 2011 年经历了一次修订，使得其更加详细且适用范围更普遍。2011 年出台的 GHG Protocol 借鉴了 PAS 2050（2008）的内容，同时还强调了一些被 ISO 14044 和 PAS 2050 忽视的概念。基于此，ISO 14067 于 2013 年面世，并在 2018 年进行了更新修订，是当下最新的碳足迹评价国际准则。

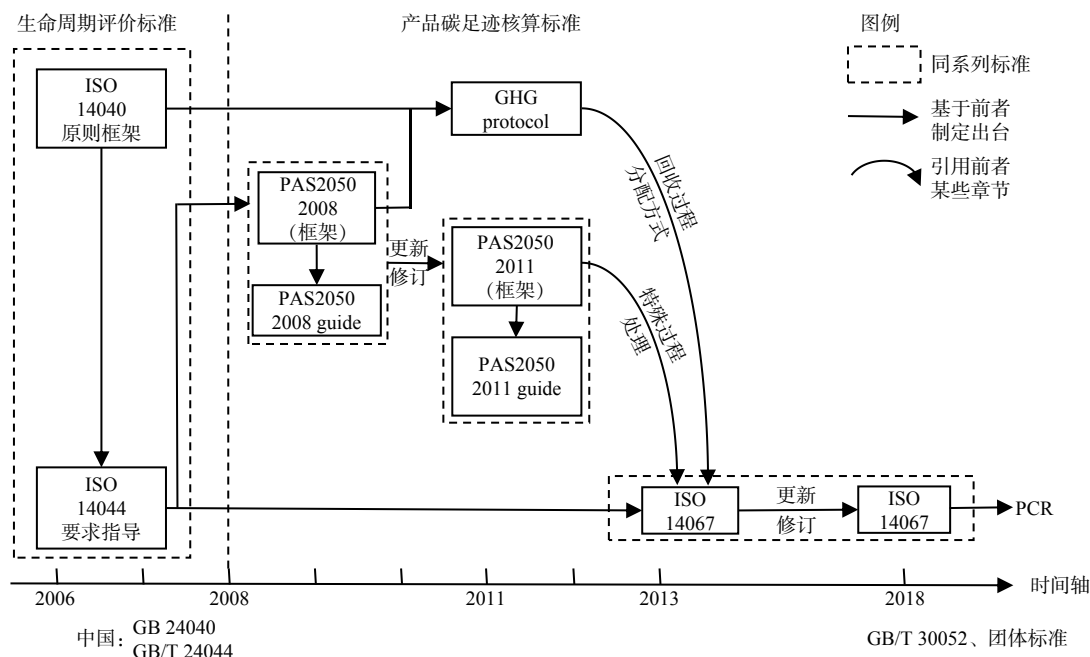


图 2 产品碳足迹国际、国内标准发展历程^[21]

Fig. 2 Development history of International and domestic standards for product carbon footprint

在中国，GB/T 24040 与 GB/T 24044 作为 ISO 14040 与 ISO 14044 的对应中文译本，发布于 2008 年。国内首部有关产品碳足迹计算的国家标准——《钢铁产品制造生命周期评价技术规范（产品种类规则）》（GB/T 30052）在 2013 年发布，继而其他领域的相关团体标准也相继确立。而针对 ISO 14067 的国标翻译及转化工作已经完成，GB/T 24067 于 2024 年 8 月 23 日由市场监管总局（国家标准委）正式批准发布。

表 2 对常见的国际碳足迹相关标准进行了对比。图 3 进一步展现了 ISO 14040、ISO 14044、PAS 2050、GHG Protocol 以及 ISO 14067 的基本框架和它们之间的关系。

更进一步地，本研究按时间顺序梳理了从 20 世纪 60 年代至今：LCA 方法、碳足迹概念、国际标准和国内标准的发展历程。如图 4 所示，从 20 世纪末开始，碳足迹迎来了其快速发展的时机，这其中不仅是全球气候条件变化得到人类的重视，更有各国政策的支持。

2) 投入产出法 (I-O)。I-O 方法由美国经济学家瓦·列昂捷夫 (W.LEONTIEF) 提出，是研究经济各部

表 2 国际碳足迹相关标准
Table 2 International carbon footprint related standards

核算层面	标准名称	发布时间	适用范围	制定组织	核算方法
终端消耗排放	GHG Protocol	2004	企业、项目	WRI/WBSD	对企业或项目现有终端排放源的监测和审计
	ISO 14064	2018	企业、项目	ISO	
全生命周期排放	PAS 2050	2008	产品、服务	BSI	建立数据库和模型，对产品/服务全生命周期碳排放进行估算
	ISO 14040/14044	2006	产品、服务	ISO	
	GHG Protocol	2011	产品、服务	WRI/WBSD	
	ISO 14067	2012	产品、服务	ISO	

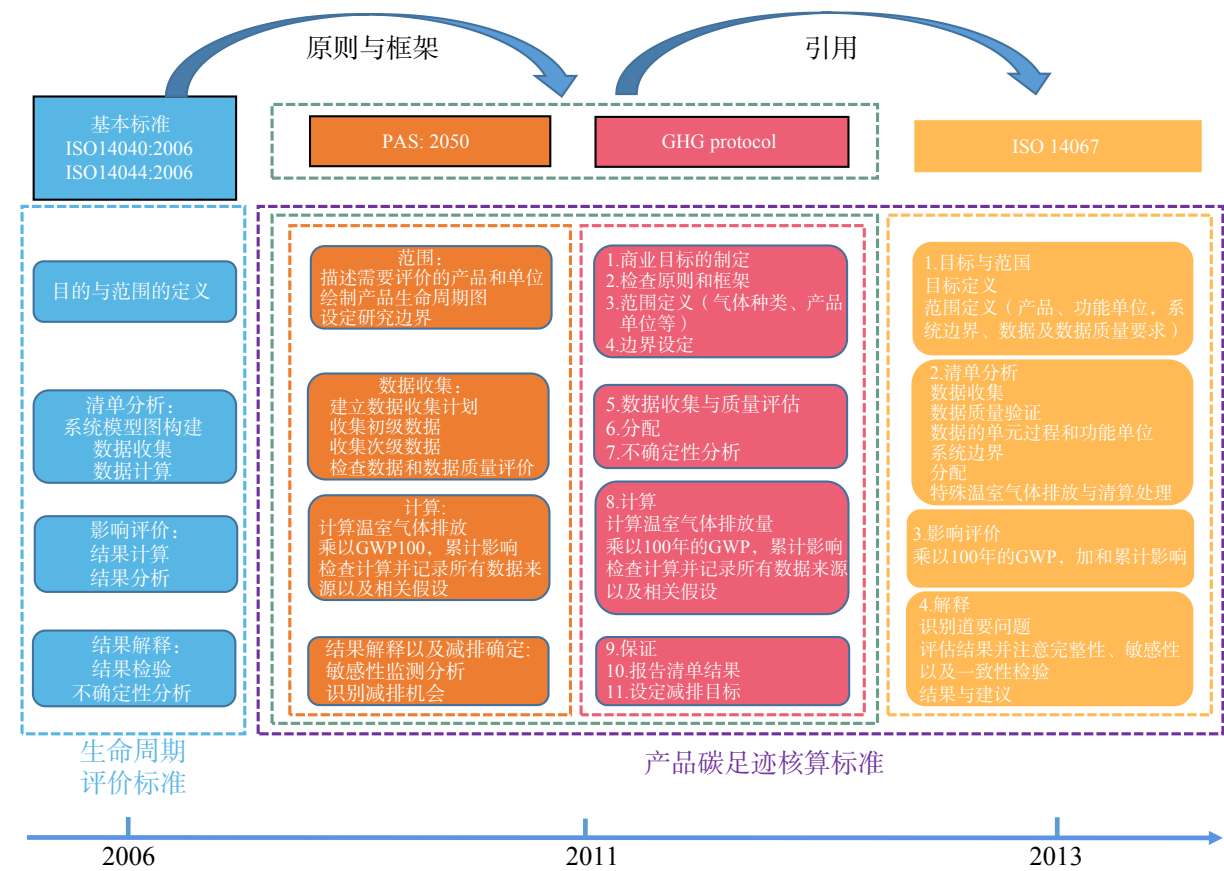


图 3 基于生命周期评价的碳排放核算相关标准

Fig. 3 Carbon emission accounting standards based on life cycle assessment

门间资源投入与产出的数学工具。结合生命周期评估，MATTHEWS 等^[17]开发了投入产出生命周期评价法（EIO-LCA），用于多层面碳足迹计算。这一模型不仅适用于衡量工业部门、企业、家庭和政府组织等各类实体的碳足迹，而且以其独特的 3 层次分析方法，为工业部门的碳足迹评估提供了一个详尽的框架。

在工业部门的案例中，模型的 3 层次分析精准地描绘了碳足迹的全貌。第 1 层聚焦于工业部门在生产和运输过程中产生的直接碳排放；第 2 层则扩展至工业部门所消耗能源的全生命周期碳排放，如电力等；第 3 层综合前两层，全面涵盖了涉及工业部门生产链的所有直接和间接碳排放，真正实现了从摇篮到坟墓的全过程分析^[36]。

此方法分为 2 步。第 1 步，根据投入产出分析，建立方程式 (2) 计算总产出。

$$Q = (I + X + X \times X + X \times X \times X + \cdots) d = (I - X)^{(-1)} d$$

(2)

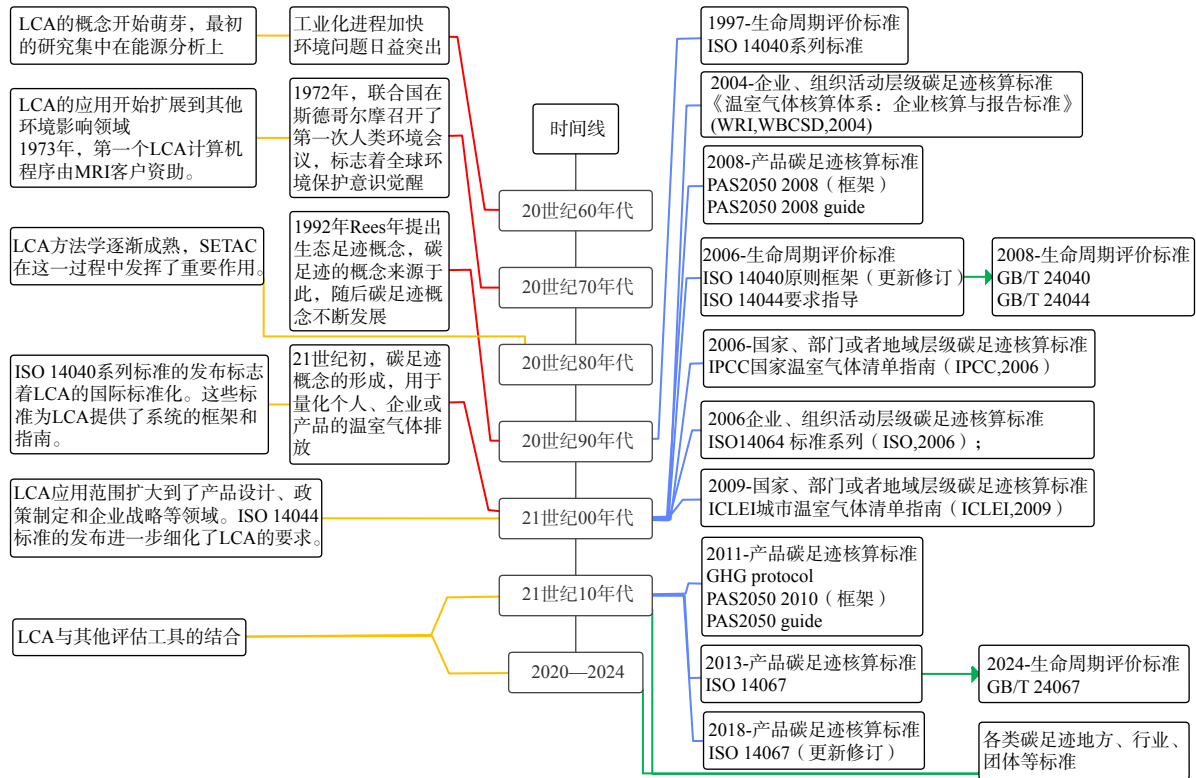


图4 LCA方法、碳足迹概念、国际标准和国内标准的发展历程

Fig. 4 The development history of LCA, carbon footprint concept, International standards, and domestic standards

式中： Q 表示总产出； I 为单位矩阵； X 表示直接消耗矩阵； d 表示最终需求； $X \times d$ 则表示部门的直接产出； $X \times X \times d$ 则表示部门的间接产出； $X \times X \times X \times d$ 表示部门间接产出的产出；以此类推。

第2步，在总产出方程的基础之上，分别计算世界资源研究所（WRI）和世界可持续发展工商理事会（WBCSD）定义的3个层面的碳足迹，如式（3）、（4）、（5）所示。

第1层面：

$$C_i = E_i(I)d = E_id \quad (3)$$

第2层面：

$$C_i = E_i(I + X')d \quad (4)$$

第3层面：

$$C_i = E_iQ = E_i(I - X)^{-1}d \quad (5)$$

式中： C_i 表示碳足迹； E_i 表示 CO_2 的排放矩阵；排放矩阵的对角线数值则分别表示经济系统内各部门单位产出的 CO_2 排放量； X 则表示能源供给部门的直接消耗矩阵^[18]。

I-O法是一种自上而下的核算方法，被广泛应用于全球、国家、区域、城市等宏观层面的碳足迹核算之中，可以反映排放的交换过程，明确直接和间接的排放关系，将生产部门或地区之间复杂的经济关系转化为温室气体排放的物理关系^[37]，它能够深度挖掘投入产出表中蕴含的信息，运用LEONTIEF逆矩阵揭示产品与其物质投入之间的物理转换关系，从而精确计算经济变化对环境造成的直接和间接影响。然而，这种方法并非没有局限性。该方法采用平均化方法计算不同部门的排放量，且投入产出表的制定更新周期较长，计算过程较为粗略，难以获取具体环节的排放，其核算结果存在一定误差^[38]；模型建立在货币价值与物质单位之间的关联之上，但相同价值的产品在生产过程中可能涉及差异巨大的碳排放量，这也可能导致估算结果的偏差；更为关键的是，投入产出分析的结果仅能提供行业级别的数据，无法深入到具体产品，因此它更适合用于评估特定部门或行业的碳足迹，而非计算单个产品的碳足迹。

3) 混合生命周期评价 (hybrid LCA, HLCA)。结合 LCA 法和 I-O 法, HLCA 既可以消除 LCA 方法的截断误差, 又可以加强对具体评价对象的针对性, 同时还能将产品的使用和报废阶段纳入评价范围^[39]。两种方法可以有不同程度的集成, 以适应和满足各类使用场景和应用要求^[40]。但是, 由于核算过程中两种方法内部边界的划分存在不确定性, 即使 HLCA 方法可以取得更完整的系统边界, 也不一定能够获得比 LCA 方法更准确的核算结果^[41], 但在一定的应用场景下, HLCA 方法也会表现出优越的性能^[42]。计算式如式 (6) 所示。

$$B = \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & M \\ L & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix}$$

(6)

式中: B 为分析对象直接或者间接的温室气体排放量; b 为微观系统的直接排放系数矩阵; A 为技术矩阵, 该矩阵表示分析对象在生命周期各阶段的投入与产出; I 为单位矩阵, L 表示宏观经济系统向分析对象所在的微观系统的投入, 该矩阵与投入产出表中的特定部门相关联; M 表示分析对象所在的微观系统向宏观经济系统的投入; k 为外部需求向量^[43]。

表 3 是对以上 3 种碳足迹分析核算方法的对比总结。

表 3 3 种碳足迹核算方法归纳总结

Table 3 Summary of three carbon footprint calculation methods

方法名称	特点	优点	缺点	适用范围
LCA	自下而上	针对性强、数据精度高	资源投入大	微观 (产品、服务等)
I-O	自上而下	资源投入小、系统性	不适用于微观	宏观 (组织、机构等)
HLCA	综合	针对性强、资源需求少、覆盖全面	对使用人员素质要求高	宏观和微观

4) 通过所使用的能源矿物燃料排放量计算 (IPCC)。IPCC 方法是国际上广泛使用的一种用于计算和管理温室气体排放的标准方法, 它由联合国政府间气候变化专门委员会 (intergovernmental panel on climate change, IPCC) 提出并详细阐述。这种方法基于 IPCC 发布的温室气体清单指南, 旨在为各个国家提供一个标准化的框架, 以量化、监测和报告温室气体排放情况。其核心步骤包括: 确定系统边界、数据收集、选择排放因子、计算排放量。计算排放量如式 (7) 计算。

$$GHG = AD \times EF$$

(7)

式中: GHG 表示温室气体排放量; AD 是活动水平 (能源消费量), 如每种化石燃料的消耗量、石灰石原料的消耗量、净购入的电量、净购入的蒸汽量等; EF 是与活动水平数据对应的系数, 包括单位热值含碳量或元素碳含量、氧化率等, 表征单位生产或消费活动量的温室气体排放系数。EF 既可以直接采用 IPCC、美国环境保护署、欧洲环境机构等提供的已知数据, 也可以基于代表性的测量数据来推算。

我国已经基于实际情况设置了国家参数, 例如《工业其他行业企业温室气体排放核算方法与报告指南 (试行)》的附录二提供了常见化石燃料特性参数^[44]。比如: 童飞等人^[45]运用 IPCC 方法对浙江省工业排放强度进行测定。

IPCC 方法为全球温室气体排放管理提供了一个统一和标准化的框架, 推动了全球气候行动和可持续发展目标的实现。但是世界各地之间的能源品质和利用效率不同, 排放因子的选择一般需要本地化调整, 以确保计算结果的准确性。比如燃料的 CO₂ 排放量可以通过式 (8) 计算排放系数。

$$EF = C \times FO \times 44 / 12$$

(8)

式中: C 表示单位燃料的含碳量; FO 表示燃料碳氧化因子。

5) Kaya 碳排放恒等式。日本学者 YOICHI KAYA 在 1989 年 IPCC 的会议上首次提出 Kaya 碳排放恒等式。如式 (9) 所示。

$$GHG = GHG / TOE \times TOE / GDP \times GDP / POP \times POP$$

(9)

式中: 揭示了温室气体排放量 (GHG) 与一次能源总消费量 (TOE)、国内生产总值 (GDP) 和总人口

(POP)之间的联系。通过因式分解,我们可以将 GHG 解构为四个核心要素:碳排放强度 (GHG/TOE)、能源强度 (TOE/GDP)、人均 GDP (GDP/POP) 及人口规模 (POP) [46]。这种分解方法的明确性和简洁性使得这些因素不仅易于理解,而且便于监控和控制。Kaya 模型在分析国家或地区碳排放的驱动因素时尤为有效,并得到了广泛的应用。该模型因其在阐释全球历史排放变化原因方面的重要作用而被认为是当前分析碳排放驱动因素的主流方法。它具备数学表达上的简便性、无残差的分解能力以及对碳排放变动驱动因素的强大解释力等诸多优势,但也存在一些限制:首先,它仅能解释碳排放量的流量变化,无法解释存量变化;其次,公式中的驱动因素主要是表象因素,对实际排放量的具体影响难以精确量化;最后,基于该等式得出的政策建议可能具有模糊性和理论性,需要结合其他因素进行综合分析和检验。

1.3 碳足迹核算方法的改进创新

ZHAO 等 [47] 在研究微藻的生物柴油生产的碳足迹核算与评价方法时,优化了碳足迹核算方法:通过使用 EP、EM 和 EV 等指标,创造性地将经济效益与碳排放相结合,对产品的低碳生产进行评估并提供战略指导。

LCA 方法的局限之一是清单分析中缺乏时间维度,卢亚东 [48] 在传统 LCA 基础上加入时间考虑和经济成本分析,使用情景分析法和 BP 神经网络法对技术进步进行动态分析,建立动态 LCA 方法,并建立动态 LCA 碳足迹分析模型。以啤酒发酵罐为例使用动态 LCA 法核算碳足迹,研究发现基于传统 LCA 核算的结果低估了发酵罐的环境影响。

2 碳足迹核算工具

20 世纪 10 年代,碳足迹的计算方法和工具不断完善,各式各样的碳足迹计算工具开始出现。2020 年至今,碳中和和政策推动,全球范围内的气候政策和碳中和目标推动了碳足迹的进一步应用。许多国家和企业承诺实现碳中和,碳足迹成为制定减排策略的重要工具。政策层面上,碳定价、碳交易等机制的实施进一步推动了碳足迹的应用。基于上述的碳足迹核算方法,形式多种多样的碳足迹核算工具被设计出来,包括但不限于 Excel 计算表、行业定制碳足迹计算器、在线个人碳足迹计算器和专业的碳足迹/碳排放计算软件等,其适用范围和特点各有不同。

2.1 Excel 计算表

ROIBaS 等 [49] 提到了一种用于自动计算厄瓜多尔香蕉碳足迹的 Excel 工具。这种工具简单易学,不要求用户具备专门的技术知识,从而使农民能够了解其农业工作对环境造成的影响。此外,这个工具对公众开放,允许使用者修改从港口到消费阶段的剩余步骤的库存数据,使得包括环保意识较强的消费者在内的各方利益相关者能够评估不同方案所造成的环境影响。

PABLO 等 [50] 对 16 个碳足迹计算工具进行了对比,其中有 6 个是 Excel 电子表格。其中有两个是同时使用基于过程和基于投入产出的库存生命周期的 HLCA 方法。

赵芮熙等 [51] 使用 GPC 协议提供的 Excel 工具和中文指南,同时结合国内和国际参数,对河北省进行了碳排放的核算。该工具由世界资源研究所、中国社会科学院城市发展与环境研究所、世界自然基金会和可持续发展社区协会共同开发,旨在提供一种科学方法,帮助中国城市进行碳排放的详细核算,从而制定有效的减排策略和低碳发展规划。

在 GHG protocol [52] 官方网站还提供了包括温室气体排放的测量和估算不确定性、范围 3 不确定性计算工具、中国燃煤电厂工具等等众多 Excel 计算表格和说明指南。主要针对组织碳足迹,内置相关排放系数,也保留了用户自定义系数的功能,为行业发展自己的碳足迹计算器提供了参考和思路。

Excel 计算表是碳足迹计算中常见的一种方式,适合中小型企业使用。本研究认为其优势在于灵活性和自定义程度高,企业可以根据具体情况调整表格和公式,以适应不同的计算需求。并且,Excel 的普及程度高,多数企业、组织和个人都能轻松使用。随着信息技术的发展,在线协同的 Excel 表格可能会使这种计算工具得到更广泛的应用。但这种工具缺点在于,对于复杂的碳排放计算,Excel 可能难以处理大量数据和复杂的计算公式。此外,Excel 计算表的准确性也依赖于输入数据的正确性和完整性,错误的数据输入可能导致计算误差。另外,Excel 表很难实现对于碳足迹数据量化结果的进一步分析和应用,以及难以实现跨组织跨部门的协同操作。

2.2 行业定制碳足迹计算器

皮阳雪等^[53]基于生命周期评价法开发的印刷服务碳足迹计算器,在 60 多家印刷企业的试运行中,指导这些企业平均实现了 30% 的节能减排,管理成本平均降低了 3.6%,并且企业利润平均增加了 2.5%。这一成果充分展示了该计算器带来的显著经济和社会效益。张欢^[54]针对麦草造纸碳足迹开发了计算软件,用 LCA 法对典型麦草制浆造纸生产线进行碳足迹、碳汇率测算。刘晓珂等^[55]在构建了水稻生产碳足迹评价模型之后,进一步设计了一款能迅速得出水稻产品的碳足迹数值、操作简便的水稻碳排放计算器,促进了该产品碳标签的推广。同时,此计算器还能深入探讨水稻生产过程中的碳排放问题,识别出碳排放密集的生产环节,并为制定水稻生产碳减排策略提供了数据支持。王艳东等^[56]基于 LCA 法和 Java Web 技术开发了一个肉鸡全生命周期碳足迹计算管理系统,采取开放使用的方式,让更多的肉鸡养殖用户与研究人员参与进来,通过记录用户数据,可以在同一地区横向对比鸡的碳足迹结果。刘洋等^[57]以产品碳足迹在线分析系统 eFootprint 为建模分析工具,以空调为研究对象,在清单分析的基础上对其进行生命周期碳足迹分析,发现空调产品的碳排放主要集中在使用阶段,在使用年限内,空调的能耗主要来自于电能消耗。

本研究认为这种针对某一行业专门设计的碳足迹计算器应用场景单一,但是其准确程度可能更高,更具有针对性。只要科学合理地划分系统边界,重视初级和次级数据的收集,并建立完善的数据库,企业就可以利用开发的碳足迹计算器,将碳足迹评价的理论方法应用于实际生产中,有利于推动企业实施节能减排措施、实现绿色发展。

2.3 在线碳足迹计算器

MULROW 等^[58]提出了一个碳足迹计算器功能指数,然后将该指数应用于 31 个在线个人碳足迹计算器,并使用雷达图对在线碳足迹计算器进行评分,并从指数得分最高的 6 个计算器中吸取经验,结合个人在线碳足迹计算器使用情况的调查,利用这些反馈和性能评估指标,为改进碳足迹计算器设计提出了建议:家庭能源消耗、交通方式选择、航班活动、食品生产与消费所产生的温室气体排放、它们如何解释州差异,以及它们如何教育和建议降低排放均需要在碳足迹计算器中被特别关注和详尽研究。

本研究认为在线碳足迹计算器虽然具有直观的用户界面,并能实时更新数据库及计算方法,为用户提供最新的碳排放数据和计算标准,支持通过互联网的远程访问也极大地方便了用户间的分享和协作。但这种工具的不足之处也不容忽视。首先,它们需要稳定的网络才能正常工作,这在网络不稳定或不可用的环境中限制了其使用。其次,在线碳足迹计算器的数据隐私和安全性要求较高,若保护措施不充分,可能会导致用户数据泄露或被不当利用。

此外,相较于专业软件,多数在线碳足迹计算器在功能上稍有欠缺,难以满足复杂或特定的测算需求,缺乏必要的灵活性和综合性。并且,这些在线工具可能过分依赖通用数据和标准化计算模型,没有充分考虑地域差异、行业特点或最新技术进步,这可能影响测算结果的精确度和适用性。虽然对用户来说直观易用,但可能因设计过于简化,不足以帮助用户全面理解自己的碳排放结构和减排途径。因此,虽然在线碳足迹计算器在便捷性和普及度上具有优势,但在功能性、安全性、准确性以及教育引导方面还有很大的提升空间。

2.4 专业的碳足迹/碳排放评估软件

专业的碳足迹或碳排放计算软件,如 SimaPro 和 Gabi,为专业人士提供了强大的工具来进行详细的生命周期评估。这些软件通常配备庞大的数据库和复杂的计算模型,可以处理高度复杂的产品系统和工业过程。

在采用软件工具进行碳足迹的计算过程中,首先要对产品功能单元的定义与输入,继而需绘制出产品的生命周期流程图并界定系统边界,此步骤被称为建立 LCA 的数据模型。数据模型构建完毕之后,便可展开数据录入过程,该过程依据已汇集的初级与次级数据进行。一般而言,对于次级数据,此类计算软件通常内置相应数据库,用户仅需于软件的数据库中进行相应选择即可。然而,某些数据库与其对应的碳足迹计算软件捆绑销售,并不提供独立数据库的出售。在此情况下,若需利用该数据库中的数据资源,则必须在其附带的软件平台中实施碳足迹的计算工作。

如表 4 所示,这是目前常见的碳足迹计算软件。然而,这些软件产品往往伴随着较高的价格标签,并且要求用户接受专门的培训以及经历一个相对较长的学习过程。对普通用户而言,使用这些高级工具可能显得不切实际,好似“大材小用”。同时,对于规模较小的企业来说,投入此类高成本可能并不具备经济效益,因

表 4 常用碳足迹计算软件

Table 4 Common carbon footprint calculation software

编号	软件	国家	简介	参考文献
1	GaBi	德国	GaBi软件是德国PE公司与斯图加特大学共同研发的LCA软件，是最早开发的LCA软件之一，它需要昂贵的许可证，但支持几乎所有类型的LCA研究，需要对LCA有较高的认识。该工具允许用户通过绘制LCA中非常直观的物质和能量流动来手动构建模型。它还提供了一个拖放选项来建立模型。该工具根据输入依次计算LCA系统。GaBi支持多个数据库，如GaBi Professional和EcoInvent。	[59-60]
2	SimaPro	荷兰	SimaPro软件由荷兰Leiden大学环境科学中心开发，可通过数据不确定性分析、敏感度分析、贡献度分析等对过程数据和评估方法的准确性和完善度进行验证，保证计算和评估结果的准确与适用性。但需要昂贵的许可证和专业的LCA知识才能学习。在SimaPro中建立LCA模型通常比在GaBi中快。SimaPro支持EcoInvent、ELCD、LCAfood、ETH-ESU、US LCI、IVAM等多个数据库。	[60-61]
3	OpenLCA	德国	OpenLCA软件是由德国柏林的GreenDelta公司运营的一款免费的开源软件，拥有地理信息系统（GIS）；可计算环境、社会和经济指标，有插件能够提供不同的更具体的元素；其开放式架构简化了数据的导入和导出，以及与其他IT环境的集成，同时可链接到其他建模软件或者对自身进行扩展。	[62-63]
4	eBalance	中国	eBalance是成都亿科环境科技有限公司于2010年开发的碳足迹LCA软件。eBalance软件采用国际生命周期基准数据系统（ILCD）的物质名称和单位，内置了中国生命周期基础数据库（Chinese reference life cycle database, CLCD）公开版、欧盟生命周期基础数据库、瑞士数据库公开版。	[64]

而可能不是最理想的选择。

其中，GaBi 数据库由 IKP、Codes、Eco Inventories of the European Polymer Industry（APME）和 BUWAL 等多个数据库联合构成，涵盖全球地理、欧洲化工工业生态影响以及包装材料等多项数据，虽然数据库内容丰富，但在种类上与 SimaPro 存在一些差异；GaBi 软件通过整合来自产业界和研究单位的清单数据库，提供了 800 多种不同的能源和材料流程，数据库主要分为能源与物质流和生产技术 2 大类；GaBi 的主要优势在于其自动计算复杂流程图的能力，能够清晰地显示各单元名称及流量；此外，其流程层次化结构使得生命周期流向更加明确，数据库分类整理完善，用户可以轻松找到所需数据；GaBi 还支持敏感度分析、冲击分析和成本分析，具备强大的数据库和建模能力，能够有效支持复杂的生命周期评估；提供高级分析功能，如参数化建模和情景分析；用户界面友好，适合不同水平的用户^[65]；这些特性使得 GaBi 成为研究人员和工业界进行环境影响评估的得力工具^[66]；但是其订阅费用较高，可能对小型企业或个人用户来说不太友好；功能强大但复杂，对于新手来说需要一定的学习时间^[67-68]。SimaPro 数据库由多个来源构成，包括 Dutch Input Output Database95、Data Archive、BUWAL250、ETH-ESU 96 Unitprocess、IDEMAT2001 和 EcoInvent 等八个数据库，这些数据库涵盖了能源与物料的投入产出、1990 年代初期的数据、包装材料、油品和电力等多个产业数据，以及环境冲击、全球变暖和温室效应等数据，为用户提供了充分的分析参考；SimaPro 软件的最大特点在于其对不同数据库的整合能力，将不同来源的数据分级存储，从而兼顾了实用性与保密性；软件的数据来源明确，选单式指令设计使其易于学习和使用；SimaPro 不仅能够使用其他生命周期软件开发的数据，还可以组合产品的生命周期，并利用不同的特征化、标准化及权重方法对环境冲击进行评估；SimaPro 支持自定义数据库和模型，适用于各种复杂场景的生命周期评估。这些特性使其成为环境影响分析的强大工具，广泛应用于研究和工业实践中，在食品、包装、建筑等多个行业都有广泛应用；支持多种语言，便于国际合作^[68]；但是数据库更新可能不够频繁，需要用户自行更新数据；在处理大量数据时，性能可能会受到影响^[69]。OpenLCA 是开源软件，可以免费使用，且源代码可自由修改^[70]；支持多种语言，便于全球用户使用；可以导入和导出多种格式的数据，与其他 LCA 工具兼容性好；有活跃的社区支持，提供丰富的学习资源^[71]；虽然 OpenLCA 提供了一些数据库，但与商业软件相比，数据可能不够全面^[70]；某些高级功能可能不如商业软件完善。eBalance 专注于碳足迹分析，适合特定领域的研究^[72]，提供了专门的碳足迹数据库；易于集成，可以与其他软件系统集成^[73]，如能源管理系统；但其适用范围有限，相比于其他工具，

eBalance 可能更专注于碳足迹，而不是完整的生活周期评估；数据库可能不如其他商业软件丰富。4 个软件的对比如表 5 所示。

表 5 专业碳足迹软件对比
Table 5 Comparison of professional carbon footprint software

软件名称	使用成本	使用难度	数据库丰富性	适用行业	社区支持
SimaPro	高	高	非常丰富，支持多种国际数据库	广泛适用于各个行业，尤其是环境科学和政策研究	专业客户支持和培训，社区支持较少
GaBi	高	高	非常丰富，包含多种行业特定数据库	广泛应用于制造业、汽车、电子等行业	专业支持和培训，社区支持有限
OpenLCA	低	中	丰富，支持多种公共数据库	活性高，适用于多种行业，尤其适合学术研究	社区支持强大，用户论坛活跃和资源丰富
eBalance	中等	中	专注于中国市场，提供CLCD等数据库	适用于能源、化工、建筑等行业	中国市场支持良好，社区支持较少

SimaPro 和 GaBi 的高成本主要来自于其专业的功能和数据库的授权费用，OpenLCA 作为开源软件，降低了基础使用的成本，但在使用高级数据库时仍需支付费用，eBalance 在中国市场的定价策略使其相对更具成本效益。SimaPro 和 GaBi 提供了复杂而强大的功能，适合有经验的用户，OpenLCA 由于其开源性质，虽然功能灵活，但可能需要用户更多的学习和适应，eBalance 的设计更贴近中国市场用户的需求，界面友好。SimaPro 和 GaBi 在数据库的广度和深度上都具有优势，特别是在国际市场上，OpenLCA 的灵活性允许用户根据需要导入多种数据库，eBalance 则专注于中国市场，提供本地化的数据支持。SimaPro 和 GaBi 的适用范围非常广泛，涵盖多个行业，OpenLCA 由于其开源特性，适合于学术研究和多种行业应用，eBalance 则专注于中国市场的特定行业。OpenLCA 得益于其开源性质，拥有活跃的社区支持，这对于用户解决问题和获取帮助非常有利。SimaPro 和 GaBi 则更依赖于官方的客户支持和培训服务，eBalance 在中国市场有较好的支持，但社区支持相对较少。

选择合适的软件需要考虑用户的具体需求、预算、技术能力和项目复杂性。开源软件如 OpenLCA 适合预算有限且需要灵活性的用户，而商业软件如 GaBi 和 SimaPro 则适合需要强大功能和专业支持的用户。对于中国市场的用户，eBalance 提供了本地化的解决方案。建议用户在选择之前，明确自身需求，并可能通过试用版或咨询专业人士来做出更明智的决策。对于不同的使用者，本研究给出相关建议，仅供参考。对于学术研究人员和学生本研究建议选择 OpenLCA，因为 OpenLCA 是开源软件，免费使用，适合预算有限的学生和研究人員，特别是当研究需要自定义模型或使用多种数据库、进行学术研究、撰写论文或完成课程作业时，尤其是当需要探索不同的数据库和方法时，其灵活性和社区支持使其成为学术研究的不二选择；对于中小型企业、需要进行基本的环境影响评估或希望在不高的成本下开始 LCA 实践的情况下建议选择 OpenLCA 或 eBalance，对于预算有限的中小企业，OpenLCA 提供了一个低成本的进入点，可以进行基本的 LCA 分析，eBalance 在中国市场提供了本地化的支持和数据库，适合中国的中小企业；对于大型企业和跨国公司建议选择 GaBi 或 SimaPro，这些软件提供了强大的功能和广泛的数据库支持，适合需要详细分析和报告的大型企业，它们的专业支持和培训服务也有助于企业在全球范围内实施一致的 LCA 策略；对于政府机构和政策制定者需要进行政策影响评估、环境法规制定或公共项目的环境影响分析时，建议选择 SimaPro，因其在环境政策和科学研究领域有广泛应用，提供了详细的分析工具和可靠的数据支持，适合用于政策制定和环境影响评估；对于环境咨询公司需要为客户提供详细的生命周期分析、环境影响评估和可持续发展咨询的，建议选择 GaBi 或 SimaPro，这些软件的强大功能和数据库支持可以满足咨询公司为客提供详细和定制化服务的需求，它们的行业数据库和专业支持有助于提供高质量的咨询服务。

选择哪种工具取决于用户的具体需求、预算以及对软件的熟悉程度，本研究给出一些建议，仅供参考。Excel 计算表灵活性高、用户可以自定义公式和表格、普及程度高、易于上手且成本较低，适用于中小型企业的简单碳足迹计算、个人或小团队的初步碳排放分析，亦可以用于教育和培训用途，帮助用户理解碳足迹

计算的基本概念;行业定制碳足迹计算器针对特定行业设计,具有较高的准确性和针对性,能够提供行业特定的减排策略和建议,适用于特定行业(如印刷、农业、制造业)的碳排放核算、企业内部的环境管理和可持续发展规划以及行业内的节能减排项目评估;在线碳足迹计算器用户界面友好,易于使用,支持实时更新和远程访问,适用于个人用户的日常碳排放核算、公共教育和环保意识提升、社区或小型组织的碳排放管理;专业的碳足迹/碳排放评估软件提供详细的生命周期评估功能、配备丰富的数据库和复杂的计算模型,但往往伴随着高昂的费用,适用于大型企业或研究机构的全面碳足迹分析、产品生命周期评估和环境影响分析、政府和非政府组织的政策制定和环境评估。每种工具都有其特定的应用场景和优势,用户应根据自身情况选择最合适的工具。

3 碳足迹数字平台

除了上述的碳足迹核算方法、工具和软件,数字平台正逐渐成为越来越多企业的首选,这主要归功于其相较于传统软件的独特优势。首先,数字平台通常提供更广泛的功能集合和更高的集成度,可以整合多个模块,如数据采集、分析、报告和决策支持等,形成一个综合性的解决方案。ANTIKAINEN 等^[74]的研究指出,数字平台可以整合多种功能,支持循环经济和可持续发展,这包括碳足迹管理在内的多个方面。其次,数字平台通常支持多用户交互和协作,能够连接不同的利益相关者,如企业、监管机构、公众等。DE REUVER 等^[75]的研究强调了数字平台在促进多方协作和构建生态系统方面的优势,这对于全面的碳足迹管理特别有价值,而传统软件可能主要面向单个用户或组织内使用。再次,数字平台通常具有处理大规模、多源数据的能力,这对于全面的碳足迹管理至关重要。ZHANG 等^[76]提出的大数据分析架构展示了数字平台在处理复杂产品制造过程中的大规模数据的能力。此外,数字平台通常设计得更具可扩展性和灵活性,可以根据需求添加新功能或整合新的数据源。BONILLA 等^[77]的研究讨论了工业 4.0 技术(包括数字平台)在可持续发展中的应用,强调了这些技术的可扩展性和灵活性。数字平台通常提供更先进的数据可视化和决策支持工具,有助于更好地理解和管理碳足迹数据。SEELE 和 LOCK^[78]的研究强调了数字化技术在提供决策支持和数据可视化方面的潜力,这对于有效的碳足迹管理至关重要。因此,数字平台在功能集成、数据处理能力、协作支持、可扩展性和决策支持等方面可能具有明显的优势。然而,具体的差异可能因特定的平台或软件而异。选择使用数字平台还是传统软件应基于组织的具体需求、现有 IT 基础设施和资源情况来决定。此外,随着技术的不断发展,传统软件和数字平台之间的界限可能会变得越来越模糊。未来的研究方向可能包括探索如何更好地整合软件和平台的优势,以及如何利用新兴技术(如区块链、人工智能)来增强碳足迹数字平台的功能和可信度。

杨明^[79]开发了一个平台原型—基于本体的产品碳足迹分析与计算平台,该平台通过用户管理、数据管理、本体处理、碳足迹管理 4 个功能模块进行实现。它能够从以 XML 为数据源的信息系统中的转换和提取产品碳足迹信息,通过排放因子计算产品的碳排放量。该平台不仅对产品的碳足迹进行计算和分析,还对结果进行处理,可以通过多个图表直观地展示碳足迹的分布情况。然而,平台的碳足迹信息是基于理想化的 XML 半结构化文档,对于实际应用中遇到的碳足迹数据结构多样性问题,仍需深入研究解决方案。

郑明春等^[80]聚焦物业智慧管理平台的界面架构和运行逻辑,以安徽合肥高速·滨湖时代广场综合体碳盘查为例,梳理碳排放核算的工作流程和关键技术,围绕范围一、范围二的碳盘查结果展开分析,为智慧物业建筑碳排放数字化管理平台的建设提供参考。该平台基于排放量数据和排放因子库,计算出选定项目的月度、季度和年度碳排放量,业主可根据需求查看和展示范围一、范围二的碳排放量趋势图,以及范围一、范围二各项排放源的排放占比图,其中外购电力排放类别还展示了各功能区的排放占比。

受限于碳管理行业属性的差异,当前诸多领域对数字化碳管理的功能体系架构尚未形成统一发展范式。如图 5 所示,根据《碳达峰碳中和管理与服务平台第 1 部分:架构规范》(T/ISC 0029—2023),可将工业数字化碳管理平台体系架构按照层级进行划分,分为数据采集层、基础设施层、数据管理层、算法模型层、应用层、展示层^[81]。大数据、人工智能、区块链等先进计算技术与工业碳管理交叉融合,在不同的功能层级发挥着较为显著的应用价值,助力数字化碳管理向更便捷、更全面、更安全的方向演进。

这些研究共同推动了碳排放监测和管理领域的技术进步和应用拓展,展示了信息化技术在促进环境保护方面的巨大潜力和价值。未来的研究应继续探索这些技术的集成与优化,以实现更高效、透明和可靠的碳排

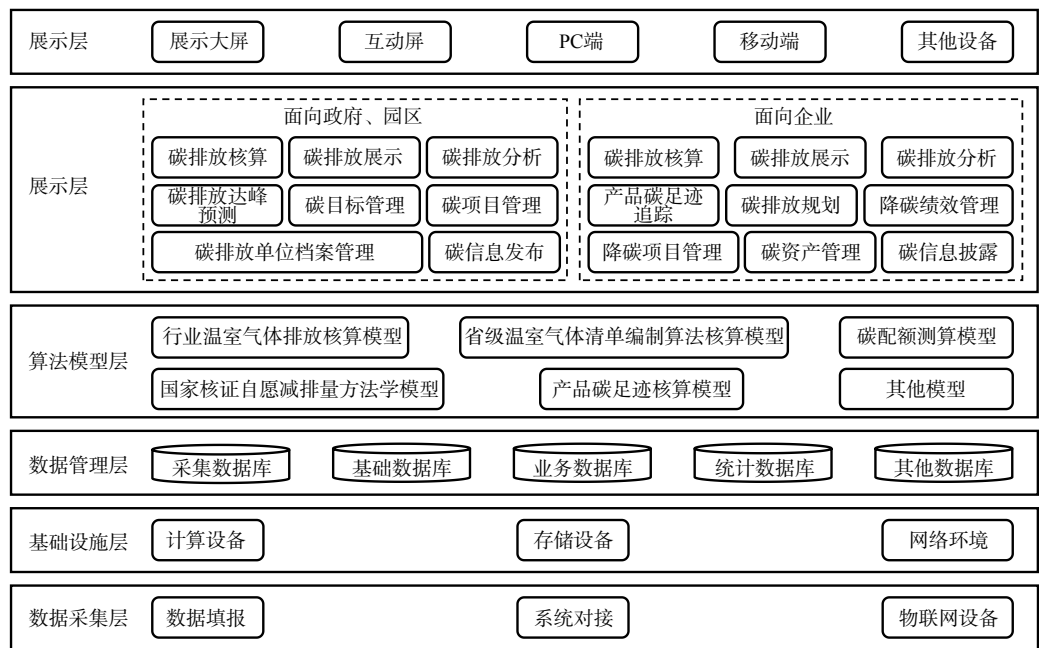


图 5 碳达峰碳中和管理与服务平台架构图^[81]

Fig. 5 Carbon peaking and neutrality management & service platform architecture diagram

放监测体系。

这些早期开发的数字化平台，界面和功能都略显不足，但是随着双碳目标的提出和碳市场的出现，越来越多的企业开始注重碳减排方面的问题，伴随着信息技术的发展，信息化和数字化管理成为现代企业的选择，除了企业自身开发的各种计算软件和数字化平台之外，最近几年国内商业化的碳足迹数字化平台也相继出现，如表 6 所示，列举了一些国内的碳足迹数字化平台。这些平台功能强大，界面简洁，多数有着针对组织级、产品级、项目级乃至个人的碳足迹评估功能，提供碳足迹分析和碳足迹报告生成等功能。

此外，国内的碳足迹数字化平台已有商业化应用的实例，其中一些平台已取得了具体成效和可量化的优势。2023 年 11 月，粤港澳大湾区碳足迹标识认证公共服务平台正式发布，平台在全国首次实现企业碳足迹

表 6 国内碳足迹数字化平台			
Table 6 Domestic digital carbon footprint platform			
编号	平台	简介	参考文献
1	碳云	碳云是由碳足迹北京科技有限公司研发的一款综合性碳核算软件，整合了Ecoinvent、Defra/DECC等国际主流数据库，支持多种碳核算模型，实现排放因子智能匹配。	[82]
2	碳擎	碳擎是由江苏繁天工业互联网有限公司推出的碳足迹核算软件。提供碳足迹清册报告自动生成、碳足迹电子看板、碳排放数据分析以及基于区块链的线上第三方核证等功能。底层兼容国内外主流LCA数据库，预置了主流模型，并化繁为简地承载了碳足迹建模等专业过程。	[83]
3	吉碳云	吉碳云是由吉利控股集团自主研发的碳足迹核算软件，内嵌国外GaBi、Ecoinvent及国内CACLD数据库。可以实现图像化过程图绘制及多用户数据共建，主要应用于汽车领域上下游企业整车及零部件的碳足迹核算。	[84]
4	中国碳足迹开放平台	2023年4月6日，天府大数据国际战略与技术研究院在成都发布中国碳足迹开放平台。该平台包含产品碳足迹在线分析系统eFootprint以及中国生命周期基础数据库CLCD，兼容欧盟数据库技术规范、ELCD数据库和ecoinvent国际数据库。	[85]
5	积木LCA云	积木LCA云是上海易碳数字科技有限公司开发的，内嵌Ecoinvent及自开发的HiQLCD数据库，独创“积木式”自动建模理念，将行业方法论与产品工艺进行融合，可实现产品碳足迹数据的核算、结果展示、贡献分析、敏感性分析与不确定性分析等功能，适用于工业行业企业低门槛使用。	[86]

申请、核算、第三方核查、报告、认证、证书及标识发放、过程监督的一体化、一站式管理服务，该平台目前已发布 45 份碳足迹报告，欣旺达、华为技术、华润、伊利近 40 多家企业已经在平台申请大湾区碳足迹标识认证；上海易碳数科联合工信部服务型制造研究院，打造国内首个绿色家居生命周期碳排放管理公共服务平台，帮助安吉家具类中小企业开展低成本、高效率、常态化的产品碳足迹核算，输出符合规范的产品碳足迹报告和碳标签，目前已为安吉绿色家居产业 200 余家厂商数十类提供产品碳足迹评价与碳标签认证服务、生命周期评价与 EPD 认证服务；钢铁行业 EPD 平台由中国钢铁工业协会组织发起，是我国首个行业性 EPD 平台，也是国内发布 EPD 数量最多、最具影响力的环境绩效披露平台，截至 2024 年 6 月，发布 EPD129 份，PCR9 份；用户注册数达到 4 326 人、EPD 下载使用达 30 708 次；“欧贝·零碳”是国内首个推出碳足迹量化计算和碳标签标识的工业品电商平台，也开创了国内首例通过工业品电商平台对生态圈供应链企业进行碳足迹服务的全新合作范式，创新了采购供应链绿色低碳管理模式，随着产品碳核算工作的全面推广，平台受到了供应链企业和生态圈客户的广泛关注，平台于 2022 年 10 月份上线，截至 24 年 6 月，来自数十个行业的近 1 500 家供应商申请服务，完成了 4 400+ 个产品碳足迹报告发布，构建零碳模型数量 4 700+ 个。

本研究发现，目前市面上的碳足迹数字化平台大多都是基于 LCA 对产品碳足迹进行分析，然后通过排放量数据和排放因子对碳足迹进行计算。通常核算范围一般分为从摇篮到大门、从摇篮到坟墓 2 种。

1) “从摇篮到大门”是指从原材料开采（摇篮）到产品离开生产工厂（大门）的过程。这种方法主要关注产品的上游阶段，包括原材料获取、运输和生产过程。这种范围界定方法数据收集相对容易，因为大多数信息都在制造商的控制范围内，适用于中间产品或原材料的评估。但是不包括产品使用和处置阶段，可能低估总体环境影响。

2) “从摇篮到坟墓”涵盖了产品的整个生命周期，从原材料开采（摇篮）到最终处置（坟墓）。这包括原材料获取、生产、分销、使用和最终处置/回收阶段。这种范围界定方法提供产品全生命周期的完整环境影响评估，有助于识别产品生命周期中的关键环境热点。但是数据收集更加复杂和耗时，对于使用阶段和处置阶段，可能需要做出假设。

4 挑战与发展方向

岳庆松等^[87]认为，利用物联网技术的数字化平台相比传统人工计算分析，更加快捷、高效。可以实现海量数据的自动化汇聚和计算，快速汇集各零配件原料碳排放数据，形成产品碳足迹报告。企业亦可通过数字化平台自动生成碳排放数据多维度多切面的对比分析图表，为企业降低产品碳排放和选择产品碳更低的供应商和零部件原材料，提升产品竞争力。

曾建光等^[88]认为物联网与区块链技术的应用，为提高信息披露的透明度提供了有效途径。我国主要采用物料核算法进行碳排放监测统计，而美国则倾向于使用 CEMS（在线监测系统）方法，欧盟则综合运用这两种方法。物联网技术在实时碳交易体系中发挥关键作用，而区块链技术则确保了数据的可信性和留存性。然而，中心化监管结构下的设备间缺乏隔离机制，一旦数据库出现问题，整个物联网及接入设备都会受损。因此，区块链技术的去中心化验证机制为解决这一问题提供了可能。随着政府对环保监测和检测领域的重视，企业利用计算机视觉、机器监测、区块链等核心技术进行环境信息监测，将成为解决环境问题的重要手段。

LIU 等^[89]开发了一个近实时的全球 CO₂ 排放监测系统，通过对卫星观测、地面大气观测和网络数据报告等数据进行分析，能够快速准确地反映全球碳排放变化，揭示了新型冠状病毒肺炎疫情对人类活动的影响，进而影响能源使用和二氧化碳排放，为政策制定者提供及时的数据支持；ZHENG 等^[90]通过对比疫情期间和疫情前后的卫星数据，研究人员分析了中国各主要经济区域的 CO₂ 排放变化，展示了卫星遥感技术在碳排放监测中的应用前景，预示着未来碳足迹计算工具将更加精确和实时；HUANG 等^[91]提出了一种基于人工智能的数据驱动方法，通过机器学习和优化技术，框架分析运输、制造和采购中的碳排放，识别减排关键领域，并制定优化策略，实时监控和预测分析帮助企业快速适应法规和市场变化，展示了在可持续供应链管理领域的创新和应用前景；SABER 等^[92]介绍了一种采用人工智能技术计算直接和间接碳足迹的创新方法，这种创新的人工智能驱动框架增强了我们向未来可持续能源过渡的能力，同时实现了清洁能源目标；陈秋霖等^[93]发明了一种使用人工智能计算碳足迹的方法和系统，使用机器学习对碳足迹进行测算，具有良好的自适

应性,能够快速计算碳足迹,相比于传统方法节省了大量的时间和资源。

在努力实现双碳目标的道路上,碳足迹计算工具以及数字化平台发挥着不可或缺的关键作用。然而,这些计算工具与数字化平台在发展过程中难免遭遇众多挑战,这些挑战覆盖多个复杂层面,但是只要解决了这些问题,进一步提升其功能与效率,就能在实现双碳目标的进程中更进一步。

4.1 遇到的挑战

1) 标准化问题:目前存在针对同一目标和事务,由不同的人或者机构进行碳足迹核算,得到的结果相差很大的问题。碳足迹核算标准化问题主要体现在方法学的不一致性和地区间的差异,针对同一个目标,不同国家和地区可能采用不同的温室气体排放因子和核算边界,这导致结果难以直接比较。虽然温室气体排放因子和核算边界的选取具有一定的主观性,但是相关标准的健全有助于减少这种差异。行业内的标准化也存在不足,不同行业可能需要特定的核算方法和参数。国家已经出台了诸多相关政策,国家标准、地方标准、行业标准、团体标准等文件近年明显增多。

2) 数据获取难度与质量保证:碳足迹的准确计算离不开大量的数据,包括原材料的提取、生产过程、运输方式、产品使用和最终处置等各个环节的数据,这些数据往往分散在不同的供应商、服务提供商和客户手中,且格式不一,难以收集和整合,并且部分数据可能涉及到国家、公司机密,进一步增大了数据获取的难度。数据的分散性和不一致性是碳足迹核算的主要障碍。数据可能来自不同的供应链环节,且格式和精度不一。数据质量的保证也是一个难题,错误或不完整的数据会影响核算结果的可靠性,且数据的代表性、完整性、准确性、一致性如何保证也是需要考虑的问题。

3) 技术整合与兼容性问题:市场上存在多种碳足迹核算工具和平台,它们可能使用不同的技术架构和数据格式。这种多样性导致了工具之间的互操作性差,数据难以共享和整合。不同的碳足迹核算工具和平台需要的数据和计算的结果之间缺乏兼容性,这不仅增加了经济成本和时间成本,更不利于学术的交流 and 技术的进步。新技术(如物联网、大数据、人工智能)的快速发展要求核算工具能够快速适应和整合。然而,现有工具可能缺乏灵活性,难以及时更新。

4) 政策法规与市场机制的适应性:各国政府为了实现碳中和目标,可能会频繁调整碳排放相关政策。政策的不确定性可能导致企业在碳足迹核算上的投入不足,这种变化要求碳足迹核算工具能够快速适应新的政策要求。碳交易市场和其他碳定价机制在不同地区和国家可能存在显著差异。核算工具需要能够适应这些差异,以支持企业在不同市场中的运营。

5) 用户接受度与市场可推广性:用户的认知不足,许多潜在用户对碳足迹核算工具的功能和重要性缺乏足够的了解,导致工具的使用率较低,更有企业不希望进行碳足迹的准确核算,因为这可能面临着减碳成本的增加。一些碳足迹核算工具可能设计复杂,用户在使用时需要投入大量时间和精力,这降低了用户的接受度,影响其在市场上的推广。

6) 国际互认与标准衔接:不同国家和地区可能采用不同的碳足迹核算标准和方法,这导致了数据的不一致性和不可比性,影响了国际互认。国际贸易和合作需要一致的碳足迹核算标准。尽管有一些国际组织(如ISO)制定了相关标准,但在实际应用中,各国的执行情况可能存在差异,导致标准衔接困难。不同国家的技术水平和语言差异可能影响碳足迹核算工具的国际推广和应用。

克服这些挑战需要多方面的努力,通过这些努力,可以逐步提高碳足迹计算工具和数字化平台的效率和准确性,更好地服务于全球的碳中和目标。

4.2 未来发展方向

1) 健全碳足迹相关标准:我国与全球其他国家在碳减排问题上达成共识,更是提出了双碳目标,后续又发布了诸多文件对全国开展碳减排工作作出了指示,健全碳足迹相关标准是完成双碳计划的重要一环。无论是出于技术需要进步的角度、还是全球碳交易市场的需求,碳足迹核算的方法学需要统一,减少不同方法带来的结果差异,确保碳足迹核算数据的准确性和一致性,以支持科学决策和政策制定,对此建议制定统一的碳足迹核算框架,制定相关标准、制定详细的实施细则和指导文件,涵盖不同的行业 and 活动类型,以确保数据的可比性和一致性。在标准制定过程中,应加强利益相关者参与,广泛吸纳政府、企业、学术界和公众的意见,确保标准的全面性和适用性,确保碳足迹标准与国家 and 国际政策的一致性,支持政策的执行和监管,制定相关法规,支持碳足迹标准的实施和执行。

2) 采用前沿技术：当前碳足迹核算数据面临数据透明度不足、缺乏有效的数据共享机制、数据来源多样且不一致、数据获取成本高、数据采集技术不足等问题。这些问题导致碳足迹计算结果公信力不足、数据孤岛现象严重、数据获取和处理复杂性增加，尤其在跨境数据互认和使用方面存在困难，不符合中国双碳战略需求，不利于国内外碳交易市场交易。为应对这些挑战，整合物联网、云计算、人工智能技术、传感器网络和大数据技术是个可行的技术路线。物联网、传感器网络和大数据技术，可以提升数据采集的精度和实时性；云计算和人工智能技术提高数据处理能力，可实现快速分析和预测。关于数据质量与兼容性问题，建议有关部门推动行业数据标准化，制定统一的数据格式和接口规范以提高不同系统之间的兼容性和数据交换的效率；建立供应链协同机制，促进上下游企业的数据共享和协作；通过政策支持和市场激励，促进企业和组织采用先进的数据获取和处理工具。另外，建立行业数据共享平台，鼓励企业间的数据合作与共享；利用区块链技术实现数据的透明化和可追溯性等方法或许能够降低数据获取难度。

3) 重视技术整合与兼容性问题：不同企业和组织使用的碳管理系统由于基于不同的技术架构和标准，导致系统集成复杂化，而缺乏统一的数据标准使得不同系统生成的数据格式不兼容；随着物联网设备、区块链应用等新技术的快速发展，确保这些新技术与现有系统的兼容性成为挑战，企业需在引入新技术时避免对现有系统的稳定性和功能性产生负面影响；复杂的供应链环境中，各环节使用的技术和系统不一致，也会增加上下游数据共享和协作的难度。为应对这些问题，除了上述的健全碳足迹相关标准和采用前沿技术两个方面以外，还可以利用中间件技术实现系统无缝集成，减少技术异构性障碍；采用模块化和开放式架构设计，以便于技术更新和扩展，提高系统灵活性和兼容性；定期进行技术评估，通过试点项目或实验室测试确保新技术的引入不影响现有系统的稳定性和兼容性。

4) 提升个人和企业的减排意识：尽管政府在提升碳减排意识和推动碳减排行动方面采取了多种措施，并且近年来关于节能减排的概念不断被宣传，然而，许多公众对于“碳足迹”这一概念仍然较为陌生。即便在企业层面，尽管部分企业对碳足迹有所了解，但并非所有企业都重视碳足迹核算。这主要是因为短期内，碳足迹核算可能不直接带来经济收益，反而需要额外投入资源。因此，加强对碳足迹重要性的科普和宣传，展示其长远的经济和环境效益，显得尤为重要。这将有助于提高个人和企业在节能减排方面的积极性和主动性。为了有效提升社会对碳足迹和碳减排的意识，可以从多个层面加强教育和信息传播。在基础教育中，应将相关知识纳入课程，培养学生的环保意识。同时，建立公众信息平台，提供关于碳足迹的知识和工具，便于公众获取信息。此外，利用社交媒体和公众人物的影响力，通过互动活动和宣传扩大影响面。在企业层面，提供经济激励和碳足迹认证，以鼓励和支持企业的减排努力，提升其市场竞争力。通过分享成功案例和行业合作，促进经验交流和最佳实践的推广。政策引导和法规支持方面，要求企业披露碳足迹，设定具体减排目标，推动社会的绿色转型。最后，开发便捷的计算工具和设立技术支持中心，为企业和个人提供有效的减排方案和咨询服务。

通过这些对策建议，可以有效健全碳足迹相关标准，支持全球碳中和目标的实现和碳市场的健康发展。碳足迹计算工具和数字化平台的未来发展将是多方面的，这些发展将更好地支持全球减排，并帮助企业和社会实现更广泛的可持续发展目标。

5 结论

本研究通过阐明碳足迹的定义及分类；综述碳足迹计算方法；分析4种主要计算工具的特点、优势与局限性，并提出针对不同用户的选择建议；探讨信息技术在提升数字化平台计算效率方面的潜力；分析碳足迹核算工具和平台发展过程中面临的挑战，得到以下结论。

1) 标准与规范层面：国内碳足迹标准正逐步与国际接轨，从2008年的GB/T 24040、GB/T 24044到2024年的GB/T 24067，这些标准为温室气体排放的量化和报告提供了框架，然而，在实施国际标准时，需要克服本地化挑战，要适应中国的经济结构和行业特性。除了要积极参与国际标准化组织的工作，确保中国的需求和经验在国际标准中得到体现，还需借鉴其他国家的成功经验进行本地化调整。尽管一些行业已经开始制定自己的碳足迹标准，但整体覆盖面和细化程度不足，影响数据的可比性和一致性。建议在政府指导下，由行业协会和专业组织制定符合行业特点的标准，并通过试点项目积累数据经验，促进标准研究和制定。政府可通过政策和资金支持，将碳足迹核算逐步纳入法规，要求企业遵循统一标准进行核算和报告。同

时,建立标准的定期评估和更新机制,确保标准与技术进步和市场变化相适应,不断优化标准内容。

2) 技术层面:碳足迹核算工具的发展已经从传统的手工计算和简单的电子表格工具,进步到专业化商业化的软件甚至数字平台。尽管这些工具在推动温室气体排放量化方面发挥了作用,但它们在准确性、易用性和使用成本方面存在差异。特别是,专业软件虽提供深入分析,但成本高昂、操作复杂,不利于中小企业和普通用户使用;虽然也有 OpenLCA 这类开源免费的软件,但是对于碳足迹核算来讲,数据库是另一核心,面对 EcoInvent、Exiobase、OpenLCA Nexus 这类收费或者部分收费的数据库,研究成本无疑被提高。而我国国内又缺少相关的数据库,使用国外的数据库难免会造成与本土情况不适应等问题,所以本土数据库的建设应该被重视。信息技术的进步使数字化平台在提升计算效率方面展现潜力。人工智能和大数据分析可以显著提高碳足迹计算的精确度和实时性;物联网技术的应用能够实现碳排放数据的自动采集和监测;区块链技术则为碳足迹数据的透明性和可追溯性提供了保障。这些技术的融合应用,将是未来碳足迹核算工具发展的重要方向。然而,技术的进步也带来了新的问题。数据的质量和可获得性是制约碳足迹核算准确性的主要因素,为此,建议加强数据标准化和共享机制的建设,以提高数据的可用性和可靠性。此外,技术集成与兼容性问题可能需要通过开放式平台和标准化接口来解决,以促进不同工具和系统之间的互操作性。

3) 社会层面:制约碳足迹核算工具与平台发展的一大因素是个人和企业对于碳足迹的认知和碳减排意识的不足。需求是促进发展的必要元素,因对其长远的经济和环境效益的认知缺失,导致对碳足迹核算工具的需求无从谈起,严重限制了其发展。应从基础教育、公共信息平台、社交媒体和公众人物、企业激励和认证、政策引导和法规支持提升社会各界对碳足迹认知和碳减排的意识。

总之,碳足迹核算工具和数字化平台对于全球应对气候变化的努力具有重要价值,但其进一步发展需解决现有挑战,并充分利用信息技术的优势,以实现更广泛和有效的可持续发展目标。随着技术的不断进步和应用的深入,这些工具和平台未来将在帮助企业和社会实现碳中和目标中发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 鲁楠,梁林俊,翟兆瑞,等.先进计算技术在工业数字化碳管理领域的应用研究[J].信息通信技术与政策,2024,50(6):37-44.
- [2] 王金丽,李丰胜,解芳,等.“双碳”战略背景下新型配电系统技术标准体系[J].中国电力,2023,56(5):22-31.
- [3] 许洪华,邵桂萍,鄂春良,等.我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J].发电技术,2023,44(4):484-491.
- [4] 王艳.“双碳”目标下中国碳排放规模情景预测[D].济南:山东财经大学,2022.
- [5] 习近平.继往开来,开启全球应对气候变化新征程[N].人民日报,2020-12-13(2).
- [6] 冯伟忠,李励.“双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J].发电技术,2022,43(3):452-461.
- [7] 任大伟,侯金鸣,肖晋宇,等.支撑双碳目标的新型储能发展潜力及路径研究[J].中国电力,2023,56(8):17-25.
- [8] 国务院.2030年前碳达峰行动方案[J].中国科技奖励,2021(12):7-15.
- [9] 国家发展改革委,工业和信息化部,市场监管总局,等.国家发展改革委等部门关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见[J].中国轮胎资源综合利用,2023(11):13-16.
- [10] 柯善北.实现绿色低碳转型走好“碳足迹”每一步《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》解读[J].中华建设,2024(7):1-2.
- [11] 魏伟.企业在碳中和愿景下低碳、零碳转型的战略和路径[EB/OL]. [2022-06-16]. <https://news.cnstock.com/news/bwxx-202206-4902083.htm>.
- [12] DIANA I, JOHN B, DOMINIK W, et al. Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(9): 093001.
- [13] TAMAR M, ALON S, JONATHAN K, et al. Social and environmental analysis of food waste abatement via the peer-to-peer sharing economy[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1156.
- [14] CHEN G W, SHAN Y L, HU Y C, et al. Review on city-level carbon accounting[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(10): 5545-5558.
- [15] REES W. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [16] 香榧与香榧加工产品碳足迹量化与评价方法: T/CIECCPA008—2022[S].北京:中国工业节能与清洁生产协会,2022.
- [17] 刘尊文,宋红茹,陈莎,等.产品碳足迹评价研究与实践[M].北京:中国质检出版社,2017.
- [18] 翟超颖,龚晨.碳足迹研究与应用现状:一个文献综述[J].海南金融,2022(5):39-50.
- [19] 张雅慧.破解碳足迹管理数据难题“箭在弦上”[N].中国汽车报,2024-07-01(29).
- [20] 朱继忠,周迦琳,张迪.清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J].中国电机工程学报,2025,45(4):1323-1343.
- [21] 刘含笑,吴黎明,林青阳,等.碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用[J].化工进展,2023,42(5):2201-2218.
- [22] HUNT R G, FRANKLIN W E. LCA—How it came about[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1996, 1(1): 4-7.
- [23] CONSOLI F, ALLEN D, BOUSTED I, et al. Guidelines for life-cycle assessment: A “code of practise”[R]. Pensacola: Environmental Toxicology and Chemistry, 1993.
- [24] SCOTT H M, T C H, L C W. The importance of carbon footprint estimation boundaries[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [25] 陈铁嵩,兰利波,郝卓,等.面向碳中和的新能源汽车全生命周期评价研究综述及趋势展望[J].汽车工程学报,2022,12(4):360-374.
- [26] FINKBEINER M, INABA A, TAN R, et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044[J]. The International

- Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2): 80-85.
- [27] Z HAUSCHILD M, K ROSENBAUM R, IRVING OLSEN S. Life cycle assessment[M]. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018: 59-167.
- [28] JONATHAN P, CORY S. Life Cycle Assessment as a decision-making tool: Practitioner and managerial considerations[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 309: 127344.
- [29] 宋国辉, 唐璐, 姜武等. 2×200MW 级某天然气热电联产项目的生命周期环境影响评价[J]. *中国电力*, 2014, 47(12): 149-155.
- [30] 马倩倩, 卢宝荣, 张清文. 碳足迹评价及其在造纸行业的应用[J]. *中国造纸*, 2011, 30(11): 64-69.
- [31] BRENTON P, EDWARDS-JONES. Carbon labelling and low-income country exports: A review of the development issues[J]. *Development Policy Review*, 2009, 27(3): 243-267.
- [32] VISENTIN C, TRENTIN S D W A, BRAUN B A, et al. Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122509.
- [33] WARD H, WENZ L, STECKEL C J, et al. Truncation error estimates in process life cycle assessment using input - output analysis[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(5): 1080-1091.
- [34] LUEDDECKENS S, SALING P, GUENTHER E. Temporal issues in life cycle assessment—A systematic review[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020, 25(8): 1385-1401.
- [35] 国家能源局. 碳足迹的概念、核算及标准[EB/OL]. [2022-07-26]. https://www.sohu.com/a/571649249_289755.
- [36] 孙昆. 基于低碳理念的竹材料家具设计研究[D]. 北京: 北京服装学院, 2016.
- [37] HAN J W, TAN Z X, CHEN M Z, et al. Carbon footprint research based on input-output model—A global scientometric visualization analysis[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(18): 11343-11343.
- [38] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 696-708.
- [39] ZHANG L, WANG C, SONG B. Carbon emission reduction potential of a typical household biogas system in rural China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013: 47415-47421.
- [40] CRAWFORD H R, BONTINCK P, STEPHAN A, et al. Hybrid life cycle inventory methods – A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018: 1721273-1721288.
- [41] YANG Y, HEIJUNGS R, BRANDÃO M. Hybrid life cycle assessment (LCA) does not necessarily yield more accurate results than process-based LCA[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 150: 237-242.
- [42] POMPONI F, LENZEN M. Hybrid life cycle assessment (LCA) will likely yield more accurate results than process-based LCA[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 210-215.
- [43] SUH S, HUPPES G. Methods for life cycle inventory of a product[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2003, 13(7): 687-697.
- [44] 孙天印, 祝韵. 金融机构碳核算的发展现状与建议[J]. *清华金融评论*, 2021(4): 55-58.
- [45] 童飞, 赵兴文, 俞滨. 浙江省工业碳排放强度现状及预测[J]. *现代工业经济和信息化*, 2023, 13. (): 9-10, 13. ()
- [46] 袁路, 潘家华. Kaya 恒等式的碳排放驱动因素分解及其政策含义的局限性[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3): 210-215.
- [47] ZHAO Q Y, HAN F, HUANG Y H, et al. Research of the carbon footprint calculation and evaluation method based on the pattern microalgae for biodiesel production[J]. *Renewable Energy*, 2024, 231: 120912.
- [48] 卢亚东. 基于动态 LCA 的啤酒发酵罐碳足迹研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- [49] ROIBÁS L, ELBEHRI A, HOSPIDO A. Carbon footprint along the ecuadorian banana supply chain: Methodological improvements and calculation tool[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016: 1122441-1122451.
- [50] PABLO K, CORNEJO M K, SANTANA E, et al. Carbon footprint of water reuse and desalination: a review of greenhouse gas emissions and estimation tools[J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2014, 4(4): 238-252.
- [51] 赵芮熙, 高小峰, 李欣豫, 等. 基于 GPC 方法的碳排放核算和减排对策研究——以河北省为例[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2024(5): 74-85.
- [52] GREENHOUSE GAS PROTOCOL. Calculation tools and guidance. [EB/OL]. <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance?ap3c=IGXmCH6WDeDPomoEAGXmCH6mIt-Db9NCNH00dmje0ZqebCmgPw>.
- [53] 皮阳雪, 陈海生, 熊立贵等. 印刷服务碳足迹评价方法及碳排放计算器的开发[J]. *包装学报*, 2015, 7(4): 35-40.
- [54] 张欢. 麦草造纸碳足迹算法及其工程软件编制[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [55] 刘晓珂, 黄红星, 韩威威. 水稻碳足迹评估方法研究及碳足迹计算器开发[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(11): 105-109.
- [56] 王艳东, 薄兴野, 刘怡然, 等. 基于 Java Web 的肉鸡碳足迹计算系统设计与实现[J]. *现代农业科技*, 2021(15): 161-162+171.
- [57] 刘阳, 王玲, 符永高, 等. 基于 eFootprint 软件的空调生命周期碳足迹分析[J]. *日用电器*, 2018(1): 18-21.
- [58] MULROW J, MACHAJ K, DEANES J, et al. The state of carbon footprint calculators: An evaluation of calculator design and user interaction features[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2019: 1833-1840.
- [59] 陆忠. 基于 GaBi 的某汽车车门全生命周期评价研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- [60] SINHA R, LENNARTSSON M, FROSTELL B. Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study[J]. *Building and Environment*, 2016: 104162-104171.
- [61] 李嘉豪, 刁明星, 沈奕, 等. 基于 SimaPro 的公路隧道建造阶段碳排放计算与构成评估[J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(6): 20-28.
- [62] 花畋. 电化学氧化处理苯酚废水的生命周期评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [63] 孙艳彬. 机电产品全生命周期评价基础数据库设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [64] 丁绍兰, 李瑞. 基于 eBalance 软件的制革生命周期评价[J]. *中国皮革*, 2016, 45(9): 35-38+41.
- [65] HERRMANN I T, MOLTESEN A. Does it matter which life cycle assessment (LCA) tool you choose? – A comparative assessment of SimaPro and GaBi[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 163-169.
- [66] SPECK R, SELKE S, AURAS R, et al. Life cycle assessment software: selection can impact results[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(1): 18-28.
- [67] WERNET G, BAUER C, STEUBING B, et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(9): 1218-1230.

- [68] FRISCHKNECHT R, REBITZER G. The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(13-14): 1337-1343.
- [69] CIROTH A, SROCKA M. How to obtain a precise and representative estimate for parameters in LCA - A case study for the functional unit[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13(3): 265-277.
- [70] CIROTH A. ICT for environment in life cycle applications openLCA—A new open source software for life cycle assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12(4): 209-210.
- [71] INGWERSEN W W, SUBRAMANIAN V. Guidance for product category rule development: process, outcome, and next steps[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(3): 532-537.
- [72] IGOS E, BENETTO E, MEYER R, et al. How to treat uncertainties in life cycle assessment studies?[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(4): 794-807.
- [73] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(1): 1-21.
- [74] ANTIKAINEN M, UUSITALO T, KIVIKYTÖ-REPONEN P. Digitalisation as an enabler of circular economy[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 73: 45-49.
- [75] DE REUVER M, SORENSEN C, BASOLE R C. The digital platform: A research agenda[J]. *Journal of Information Technology*, 2018, 33(2): 124-135.
- [76] ZHANG Y, REN S, LIU Y, et al. A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 626-641.
- [77] BONILLA S H, SILVA H R O, DA SILVA M T, et al. Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges[J]. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3740.
- [78] SEELE P, LOCK I. The game-changing potential of digitalization for sustainability: Possibilities, perils, and pathways[J]. *Sustainability Science*, 2017, 12(2): 183-185.
- [79] 杨明. 基于本体的产品碳足迹分析与计算平台研究与实现[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [80] 郑明春, 陆韬霆, 沈瑶, 等. 智慧物业建筑碳排放核算与数字化管理平台研究[J]. *建筑科技*, 2023, 7(6): 58-61+70.
- [81] 中国互联网协会. T/ISC 0029—2023. 碳达峰碳中和管理与服务平台[S]. 北京: 中国互联网协会, 2023.
- [82] 碳阻迹. 一站式碳管理 SaaS 平台“碳云”升级, 助力助万家企业实现碳中和[EB/OL]. [2021-09-23]. https://www.sohu.com/a/491474627_629109.
- [83] 江苏擎天工业互联网有限公司. 碳擎-数字化碳管理与核查系统[EB/OL]. <https://www.skyco2.com/product/2.html>.
- [84] 吉利数科. 吉利数科积极布局碳管理业务, 以数字技术助企业碳中和[EB/OL]. [2022-11-08]. <https://new.qq.com/rain/a/20221108A08EKD00>.
- [85] 天府大数据国际战略与技术研究院. 中国碳足迹开放平台正式发布[EB/OL]. [2023-04-07]. <https://finance.sina.com.cn/esg/2023-04-07/doc-imypppah8541069.shtml>
- [86] 上海易碳数字科技有限公司. 积木 LCA 云 2.0 系统用户手册[EB/OL]. 上海易碳数字科技有限公司, 2024-07. [2024-08-15].
- [87] 岳庆松, 马荣军, 周沈露, 等. 电子纸全产业链产品碳足迹数字化平台的探索和实践[J]. *信息技术与标准化*, 2024(3): 93-101.
- [88] 曾建光, 邹玉涵, 尤澜涛. 物联网+区块链技术、碳排放透明度与产业升级变革[J]. *中国发展*, 2021, 21(S1): 83-88.
- [89] LIU Z, DENG Z, HE G, et al. Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5172.
- [90] ZHENG B, GENG G, CIAIS P, et al. Satellite-based estimates of decline and rebound in China's CO₂ emissions during COVID-19 pandemic[J]. *Science Advances*, 2020, 6(49): eabd4998.
- [91] HUANG R, MAO S. Carbon footprint management in global supply chains: A data-driven approach utilizing artificial intelligence algorithms[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 1234-1245.
- [92] SABER AY, ALAM MA, KHANDELWAL T. CO₂ footprint and nodal marginal emission up to distribution end users for energy mix[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 83733-83739.
- [93] 陈秋霖, 喇元, 卓然, 等. 一种使用人工智能计算碳足迹的方法和系统: CN117198430A[P/OL]. 2023-12-08.

(责任编辑: 陶雪)

From traditional methods to digital platforms: Technological progress and application progress of carbon footprint accounting tools

LIU Hanxiao^{1,2,3,4,*}, YE Pengtao², RAN Chumeng⁵, YU Liyuan¹, CUI Ying¹, LIU Zhong², LIU Meiling¹, SUN Li¹

1. Feida Environmental Protection Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Zhejiang Environmental Protection Group Eco-Environmental Research Institute, Hangzhou 310030, China; 4. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 5. CHN Energy Taizhou Power Generation Co., Ltd., Xuzhou 221008, China

*Corresponding author, E-mail: gutounan@163.com

Abstract In the global context of addressing climate change, the importance of carbon footprint accounting tools and digital platforms is increasingly evident. This paper outlines the definition and classification of carbon footprints, the main characteristics, advantages, and limitations of five calculation methods, and provides recommendations for different users. It explored the potential of information technologies in digital platforms and summarized the main challenges faced during the development of carbon footprint accounting tools and platforms, offering relevant suggestions. Since the 1990s, when the concept of carbon footprint was introduced, and based on lifecycle analysis (LCA) as the core theoretical basis, carbon footprint accounting tools have progressed through key stages such as manual calculations with spreadsheets, systematic software like SimaPro with databases, and platforms supported by big data and cloud technology, with increasing levels of automation, standardization, and internationalization. Currently, carbon footprint accounting tools face major challenges, including the localization and insufficient coverage of international standards, high costs and complexity of use, difficulty in data acquisition and inconsistent quality, and insufficient social awareness of carbon footprints and emissions reduction. To address these issues, it was recommended to enhance the localization adaptability and alignment with international standards at the level of standards and norms; technically, to leverage artificial intelligence, big data, the Internet of Things, and blockchain to build localized, standardized, and shareable databases, develop user-friendly and cost-effective accounting tools, and improve accuracy and transparency. Socially, to enhance consensus through education, public information platforms, social media, corporate incentives, and policy guidance, thereby promoting broader application of carbon footprint accounting tools.

Keywords carbon footprint; carbon footprint assessment tool; digital platform