

• 专 论 •

中药绿色制造碳足迹核算的关键问题与对策

慈志敏^{1,4}, 马鸿雁¹, 李正², 杨明³, 王学成³, 伍振峰^{3*}, 张定堃^{1,4*}

1. 成都中医药大学 西南特色中药资源国家重点实验室, 四川 成都 611137

2. 天津中医药大学 现代中药创制全国重点实验室, 天津 301617

3. 江西中医药大学 经典名方现代中药创制全国重点实验室, 江西 南昌 330004

4. 成都中医药大学天府中医药创新港 现代中药产业学院, 四川 成都 611930

摘要: 在全球应对气候变化及我国实施“双碳”战略背景下, 推动中药产业绿色低碳转型是实现其高质量发展的关键路径。碳足迹作为重要评价指标, 对中药产业绿色制造升级与国际竞争力提升至关重要。系统剖析了中药绿色制造的内涵及其与碳足迹核算的内在联系, 综述了国内外碳足迹核算政策、标准体系及制药领域研究进展。聚焦中药产业的特殊性, 基于生命周期评价(life cycle assessment, LCA)理论, 深入揭示当前碳足迹核算面临的关键问题: 数据基础薄弱且不确定性高、系统边界与分配规则模糊、通用模型难以适配中药“能-质-效”时空耦合特性。为此, 倡议推进LCA理论的本土化重构, 构建覆盖“药材-炮制-制剂”全链条的动态核算模型, 建设行业专属数据库, 发展智能数据采集技术, 并推动标准体系与政策协同。旨在为建立“低碳-优质-高效”融合的中药绿色制造评价新范式提供理论支撑, 服务中医药产业“双碳”战略与可持续发展。

关键词: 中药绿色制造; 碳足迹; 生命周期评价; 数据融合; 系统边界; 核算模型

中图分类号: R28 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)03-0789-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.03.001

Key issues and countermeasures of carbon footprint accounting for green manufacturing of traditional Chinese Medicines

CI Zhimin¹, MA Hongyan¹, LI Zheng², YANG Ming³, WANG Xuecheng³, WU Zhenfeng³, ZHANG Dingkun^{1,4}

1. State Key Laboratory of Southwestern Chinese Medicine Resources, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China

2. State Key Laboratory of Chinese Medicine Modernization, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

3. National Key Laboratory of Classic Formula Modern Chinese Medicine Creation, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

4. College of Modern Chinese Medicine Industry, Tianfu TCM Innovation Harbour, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611930, China

Abstract: Against the backdrop of global efforts to combat climate change and China's implementation of the dual-carbon strategy (carbon peaking and carbon neutrality), advancing the green and low-carbon transition of the traditional Chinese medicine (TCM) industry represents a critical pathway toward achieving sustainable and high-quality development. Carbon footprint, as an important evaluation indicator, is crucial for the green manufacturing upgrade and international competitiveness enhancement of the TCM industry. This study systematically explores the connotation of green manufacturing of TCM and its intrinsic relationship with carbon footprint accounting. It also reviews current carbon footprint accounting policies, standards, and research advancements both domestically and internationally, particularly within the pharmaceutical sector. Based on life cycle assessment (LCA) theory and

收稿日期: 2025-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(82173991); 四川省科技计划项目(2023NSFSC1994); 成都中医药大学杏林学者项目(ZYTS2023005)

作者简介: 慈志敏, 讲师, 从事中药制药工程与绿色制造新技术研究。E-mail: zmci@cdutcm.edu.cn

*通信作者: 伍振峰, 教授, 博士生导师, 从事中药新剂型与新技术/中药制药装备研究。E-mail: zfwu527@163.com

张定堃, 教授, 博士生导师, 从事中药制药与品质评价新技术研究。E-mail: zhangdingkun@cdutcm.edu.cn

focusing on the unique characteristics of the TCM industry, this paper deeply reveals the key issues currently faced by carbon footprint accounting: weak data foundation and high uncertainty, ambiguous system boundaries and allocation rules, and the difficulty of general models in adapting to the spatio-temporal coupling characteristics of “energy-quality-efficiency” in TCM. Therefore, it is urgent to promote the localization and reconstruction of LCA theory, build a dynamic accounting model covering the entire chain from “medicinal materials-processing-preparation”, establish an industry-specific database, develop intelligent data collection technology, and promote the coordination of standard systems and policies. This research lays a theoretical foundation for constructing a novel evaluation paradigm for TCM green manufacturing-characterized by low carbon emissions, high product quality, and high operational efficiency and contributes to serving the dual-carbon strategy and the sustainable development of the TCM industry.

Key words: TCM green manufacturing; carbon footprint; life cycle assessment; data fusion; system boundary; accounting model

在全球应对气候变化的大背景下，我国积极推行“双碳”政策，旨在通过减少碳排放，实现经济社会的可持续发展。近两年，国家发展改革委等15部委先后出台《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》、《完善碳排放统计核算体系工作方案》、《加快建设碳排放双控制度体系工作方案》等系列政策，明确提出2025年以前重点夯实行业企业碳排放数据基础、完善碳排放核算制度方法，到2027年初步建立碳足迹管理体系，制定发布与国际接轨的产品碳足迹核算通则标准，到2030年全面提升碳排放核算能力水平，构建系统完备的碳排放统计核算体系，确保碳排放数据能够有效满足各层级、各领域、各行业碳排放管控要求^[1-3]。中药产业作为我国传统优势产业，正处于高质量发展的关键时期。国务院办公厅《关于提升中药质量促进中医药产业高质量发展的意见》明确提出要加快推进中药产业转型升级，运用数智技术、绿色技术赋能全产业链高质量发展，中药绿色制造已成为实现中药产业可持续发展的关键路径^[4-5]。碳足迹作为衡量温室气体排放量的重要指标，受到广泛关注，已逐渐成为全球贸易壁垒的关键抓手和衡量可持续表现的核心指标^[6]。

近年来，国内外政策和市场对碳足迹的要求，正迅速从自愿走向强制、从区域化走向全球化，碳足迹研究逐渐成为政策制定、企业管理和社会认知的重要依据。我国碳市场碳价从60元/t飙升至80元/t以上；据生态环境部消息，截至2025年6月，全国碳市场累计交易量已突破6亿t，企业减排成本刚性上升^[7]。中药生产过程复杂、环节多，是能耗、物耗较高的行业，关注中药行业碳排放，开展中药产品碳足迹核算研究，是实现中药产业绿色转型和可持续发展的时代需要^[5,8]。

1 中药绿色制造与碳足迹核算

1.1 绿色制造的内涵

绿色制造（green manufacturing, GM）是一种低消耗、低排放、高效率、高效益的现代化制造模

式。其本质是统筹考虑产业结构、能源资源、生态环境、健康安全、气候变化等因素，将绿色发展理念和管理要求贯穿于产品全生命周期中，以制造模式的深度变革推动传统产业绿色转型升级，引领新兴产业绿色发展，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，从而实现经济效益、生态效益、社会效益协调优化^[9]。我国绿色制造体系主要建设内容包括绿色产品、绿色工厂、绿色园区、绿色供应链等。这对于中药制药行业推进绿色制造具有重要的借鉴意义。

中药绿色制造是一项跨学科、跨领域的系统工程，其内涵不仅要求产业摆脱传统路径提高绿色化、数字化水平，更需通过绿色设计、清洁生产、生态协同实现“资源-环境-经济”平衡，以助推中医药产业高质量发展^[10-12]。

1.2 碳足迹核算的理论框架

1.2.1 碳足迹的概念与核算边界 碳足迹（carbon footprint, CF）的概念源于“生态足迹”一词，一般指产品或服务等在一定时间内直接或间接导致的温室气体排放量和清除量之和，通常以二氧化碳当量来表示（CO_{2eq}），包括二氧化碳、氧化亚氮、甲烷、全氟化合物、氢氟碳化合物、三氟化氮等^[3,13]。碳足迹是衡量气候变暖问题的重要工具，常被用来评估人类活动对环境的影响，是评价环境可持续性的关键指标。

在中药领域，碳足迹包括企业碳足迹和产品碳足迹等不同类型。其中企业碳足迹是指企业在生产运营过程中，包括原材料采购、生产制造、物流运输、产品销售等各个环节所产生的碳排放。产品碳足迹是指中药材、中药饮片、中药提取物、中成药等各类中药产品在其全生命周期内，从原材料获取、加工制造、运输配送、销售使用到废弃处理等各个阶段所产生的碳排放^[14]。

1.2.2 核算的标准与方法体系 碳足迹核算需遵循系统性、一致性及可比性等原则，确保核算结果

准确。目前，国际上以生命周期评价（life cycle assessment, LCA）理论为核心方法论，其理论框架包括系统边界确定、生命周期清单分析、评价模型构建和结果解释与不确定性分析4个维度^[15]。国际通用标准如ISO 14040/14044提供方法论基础，GB/T 32150-2015则为国内工业场景提供规范，GB/T 24067-2024规定了产品碳足迹的研究范围、原则和量化方法等。在通用标准的基础上，各行业纷纷发布行业细化标准，如钢铁、有色金属、电子电器等^[16]。对于中药产业，目前暂未发布针对行业相关标准，碳足迹核算标准不统一。

2 碳足迹核算国内外研究现状

2.1 碳足迹核算体系建立是未来的“必修课”

近年来，欧盟、美国、日本等发达国家和地区陆续承诺，将在2050年前后实现净零碳排放，一些国家政府正在尝试将产品碳足迹管理作为应对气候变化的政策工具^[6]。《欧盟电池法案》、碳关税等国际规则倒逼出口型企业建立碳足迹追溯体系。欧盟加速数字产品护照(digital product passport, DPP)在其绿色贸易壁垒政策中的绑定，可持续生态产品设计法规明确，未来包含产品碳足迹等信息的DPP将强制应用于纺织品、电子电器、农产品等更多产品品类。

我国碳足迹研究起步较晚，但近年来发展迅速。“双碳”目标背景下，先后密集出台一系列政策，明确将碳排放指标纳入国民经济和社会发展规划。《“十四五”医药工业发展规划》要求促进全产业链绿色低碳发展，构建绿色产业体系，提高绿色制造水平，实施医药工业碳减排行动^[17]。中药产业走低碳高质量发展之路，碳足迹核算将是未来的“必修课”。

2.2 LCA引领碳足迹核算主流方向

在国际上，碳足迹核算起步相对较早，相关理论和方法发展较为成熟，形成了生命周期评价、投入产出分析、排放因子法、质量平衡法、实测法等经典核算方法和模型^[14]。LCA通过详细梳理产品从原材料获取、生产加工、运输、使用到废弃处理全过程的物质与能量流动，定量分析碳排放量，在建筑、交通、电力、电子电器、化工及农业与食品等多个行业广泛应用，是目前最常用的核算方法^[18-19]。

近年来，制药领域的碳排放问题也逐渐引起重视。有学者分析了12家全球最大的制药公司在2017年和2018年的碳排放和财务数据，发现许多公司成功降低碳排放，同时保持盈利^[20]。Belkhir等^[21]则

通过构建模型分析全球15家最大制药公司的排放强度，揭示制药行业的碳排放强度远高于汽车行业。在产品层面，碳足迹研究主要集中在化学制药，涉及剂型、溶剂、辅料、包装、“三废”处置等对原料药及制剂产品碳足迹的影响^[19, 22-24]。生物制药领域也有一定研究报道，如Renteria等^[25]基于生命周期评价方法对生物制药过程中冷冻干燥阶段进行分析，探讨电力消耗在不同时间、区域及不同生产阶段的碳足迹，指导企业规范生产管理。化学、生物制药工艺参数较稳定，数据标准化程度高，化学制药原料来源相对集中和明确，国际上有较成熟的碳足迹核算标准和背景数据库支撑。

2.3 中药产业碳足迹路径不明、核算标准和方法不统一

我国积极引入LCA理论与方法，结合我国国情与产业特色进行模型本土化探索。目前，我国碳足迹核算已广泛应用于钢铁、水泥、锂电池、电子产品、农产品、汽车、造纸等多个行业^[26-27]。国内学者在制药领域的碳足迹研究相对较少，特别是中药领域，还属于起步阶段。课题组于2022年提出中药制药企业碳足迹核算模型的构建方法，梳理了碳排放较多的制药工艺环节，并以根类中药饮片和中药口服液的生产为例简述其核算要素；基于生命周期评价理论，结合排放因子法，以桑叶提取物为例，开展中药提取物碳足迹核算研究，发现乙醇溶剂消耗对碳足迹贡献最大^[14, 28]。同济大学等聚焦中药制药企业碳排放问题，以上海某中药生产基地为案例开展研究，运用排放因子法进行碳足迹核算，发现该基地企业80%以上的碳排放来源于电力和热力的消耗，为企业实现碳中和提供参考^[29]。越来越多的中药制药企业积极开展企业或者产品碳足迹核算，如津药达仁堂在《2023年度可持续发展报告》中披露企业碳排放量和碳管理数据，核算方法依据《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)》；华润江中的健胃消食片和复方草珊瑚含片获得中国船级社质量认证有限公司颁发产品碳足迹评价证书，核算准则为ISO14067:2018和PAS2050:2011等标准^[30-31]。

总体而言，国内外碳足迹研究历史并不长，尽管生命周期法作为主流方法被广泛应用于多个行业碳足迹模型构建，但因中药产业的特殊性，碳足迹路径尚不清晰，缺乏统一的核算方法和标准，缺乏行业背景数据库，需进一步深入分析和探讨其关

键科学问题。

3 中药产业的特殊性

3.1 产品原料多样性与质量标准差异性

中药产品种类繁多，包括中药材、饮片、提取物和中成药等，每种产品在生产工艺、质量标准和使用场景上都有显著差异。中药材来源广泛，包括植物药、动物药、矿物药等，其生长、采集、加工方式差异大。以植物药为例，种植采收周期长，受气候、土壤、地域影响显著，不同产地、采收季节的药材在成分含量方面存在差异。同一中成药品种，不同企业的生产工艺也可能存在较大差异，增加了碳足迹核算的复杂性。

3.2 产业链长、产碳固碳环节多元交织

中药产业链的碳流动呈现“农业固碳为主、工业排碳为主”的二元特征，且碳源与碳汇环节相互交织（图1）。在农业（种植）环节，以碳汇为核心，植物通过光合作用吸收大气CO₂转化为生物量，土壤有机质积累也形成长期碳封存。但该环节仍存在少量碳排放，如化肥施用、农机耕作及灌溉能耗等。在工业（生产）环节，以碳排放为主体，包括各工

序蒸汽与电力消耗、溶剂和辅料使用等。仅存在少量固碳减排潜力，例如中药渣资源化利用、溶剂回收和余热利用等，但这类固碳量远低于工业生产的总排放量^[32-33]。这种兼具“农业+工业”的双重属性，使得中药产业的碳足迹核算极为复杂，需要同时精准量化种植阶段的碳汇效益和工业全链条的净碳排放。

3.3 时空异质、影响因素变量错综复杂

中药产品碳足迹受时间和空间因素影响显著。以来源于植物药的中成药为例，产业链涵盖原料、生产及运输三大系统，涉及从中药材种植、采收、加工、运输到炮制及制剂生产等多个环节。种植采收时间、种植地区气候土壤条件、种植模式、运输方式和距离、加工炮制方法、生产时间及生产工艺，多个时空因素交织，影响变量错综复杂；具有显著的时空异质性，涉及年份、季节、地区、企业的能源、物质消耗不同导致的碳排放差异。例如最新公布的2022年我国电力平均二氧化碳排放因子为0.5366 kg CO₂/kWh，华北地区火电占比大，使得河北、山西等省份排放因子较高，而四川、云南等西

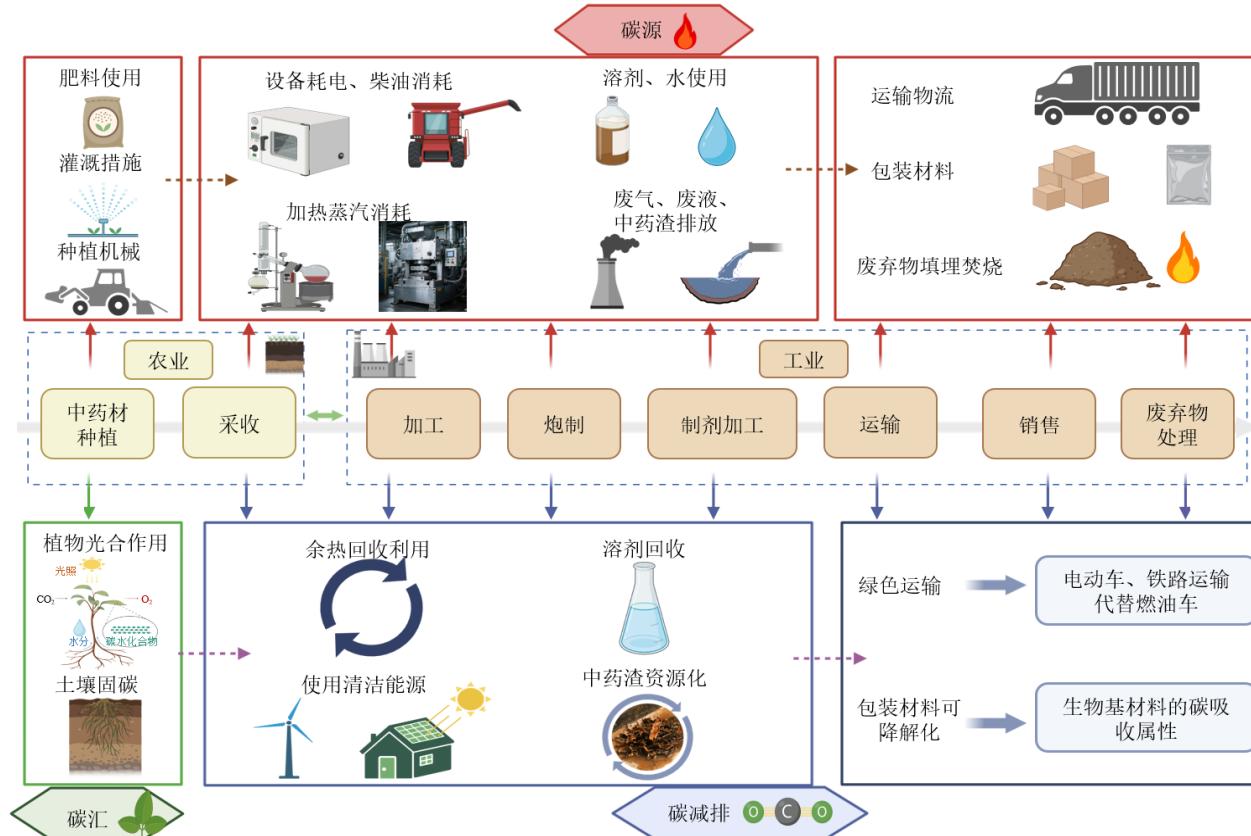


图1 中药产业链碳源-碳汇交织示意图

Fig. 1 Schematic diagram of carbon source-sink interactions in traditional Chinese medicine (TCM) industrial chain

南地区以水电为主，省级排放因子远低于全国平均水平，其中河北最高，为 $0.725\text{2 kg CO}_2/\text{kWh}$ ，云南最低，仅为 $0.107\text{3 kg CO}_2/\text{kWh}$ ，同样的电能消耗，不同省份所产生的碳排放差别大^[34]。以临床应用广泛和市场需求巨大的中成药大品种板蓝根为

例，国内共有批文800多件，生产企业覆盖全国多个省市^[35]。其主要成分板蓝根来源植物菘蓝在我国种植分布广泛，主要集中在东北、华北、华东、中南、西南和西北地区^[36]。板蓝根颗粒的碳足迹受多种因素影响，具有显著的时空异质性，如图2所示。

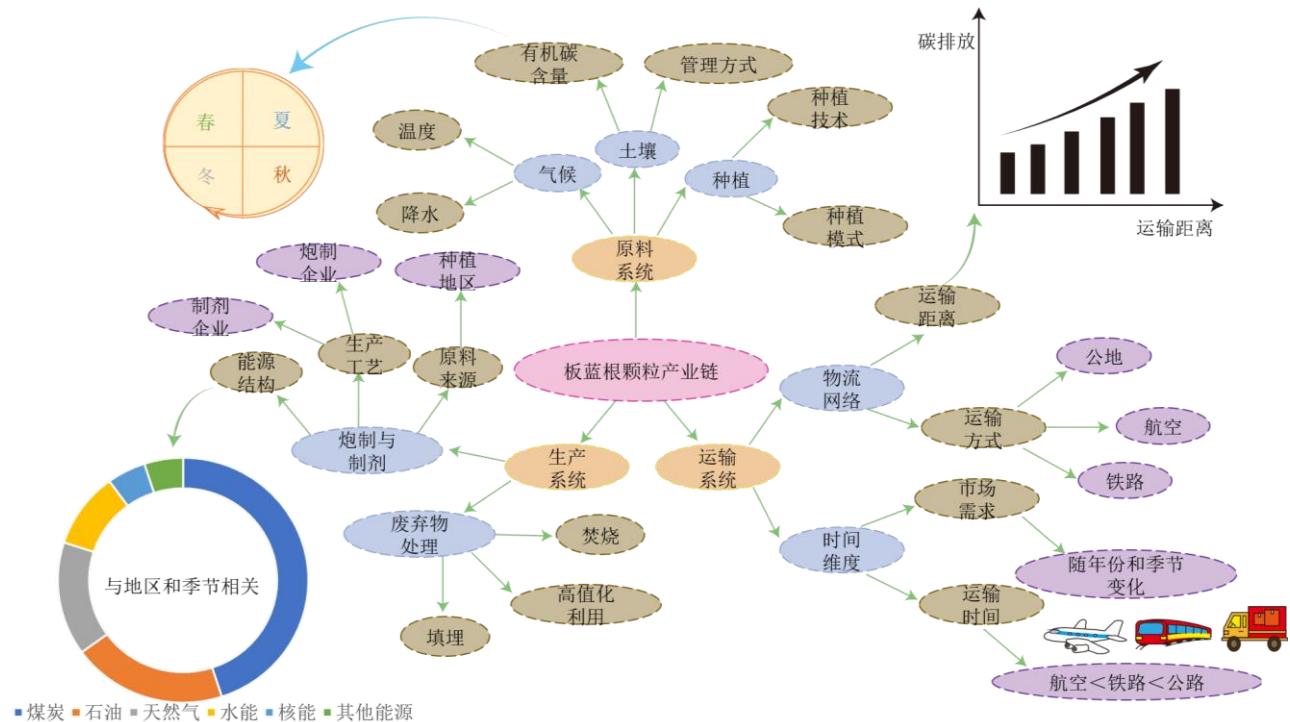


图2 板蓝根颗粒产业链时空异质性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spatio-temporal heterogeneity of industry chain of Banlangen Granules

3.4 中药与化学药/生物药的碳足迹差异

中药与化学药、生物药不同，其产品种类繁多、成分复杂，原料来源更加广泛、生产工艺多样，原料获取受自然地理因素影响显著、碳流动复杂，中药产业链长、环节多、批量小、连续化生产不足，标准化程度低、数据基础薄弱，其碳足迹核算更加复杂。而目前制药领域碳足迹研究相对成熟的化学药则不同，原料来源相对集中和明确，供应链较为稳定，更具可追溯性，生产工艺标准化、自动化程度高、数据基础好，碳足迹核算相对成熟。表1从原料特性、生产特征、产业链结构、数据基础及模型需求等不同维度对比中药与化学药、生物药在碳足迹核算方面的主要差异。

4 中药碳足迹核算的关键问题

4.1 数据获取与质量问题

数据是中药碳足迹核算的基础，其质量直接关系到核算结果的准确性与可靠性。中药产业链的数据体系呈现“三高三缺”特征，即高碎片化、高异

质性、高不确定性，缺乏种植端碳汇数据、缺乏企业实测数据、缺乏行业碳排放因子基础数据，需融合多源异构数据，恰当处理缺失数据，提高数据质量，并采用适当的方法实测核验，增加数据来源可信度。

4.1.1 数据来源分散、质量参差不齐 中药碳足迹核算面临数据来源分散、质量参差不齐的难题。在数据获取方面，数据来源渠道多样，主要包括企业生产记录、文献报道、行业统计年鉴、实地调研以及政府部门发布的统计数据等，不同来源的数据可靠性差异较大。例如，中药材种植环节数据多依赖农户调研、地方农业统计，数据采集存在样本量不足、记录不规范问题，且植物叶面积处于动态变化中，碳吸收非固定值；加工与炮制制剂环节涉及企业生产台账、设备能耗监测数据，相对准确可靠，但部分企业出于商业保密或技术限制，难以提供完整数据，导致数据缺失率较高。数据可靠性也受多种因素影响，例如中药材种植过程中，化肥农药使

表1 中药与化学药/生物药的碳足迹核算特征对比分析

Table 1 Comparative analysis of carbon footprint accounting characteristics of traditional Chinese medicines and chemical/biological medicines

核算维度	中药	化学药	生物药
原料特性	植物药、动物药、矿物药, 来源广泛, 种类繁多, 依赖生物多样性与自然地理环境 ^[37] , 具有固碳-排碳双向碳流动特点	石油基/化工合成单体, 集中生产, 来源相对明确 ^[38] , 原料碳足迹易追溯, 地域差异小, 属于单向碳排放	生物体或其他生物材料, 来源于细胞培养、微生物发酵或动物源 ^[39] , 地域影响小, 基本属于单向碳排放
工艺特征	①复杂多样, 涉及炮制等特殊工艺, 环节多、批量小、连续化生产不足 ^[40] , 核算难度大 ②“三废”高有机物负荷, 药渣、高 COD 废水等废弃物处理环节复杂多样 ^[41] , 且不同处理方式碳排放差异大 ^[33]	①相对稳定, 合成工艺参数标准化、自动化程度高 ^[42] , 利于精确计算碳排放 ②“三废”处理技术较成熟, 含重金属/有毒溶剂废液等 ^[43]	①工艺独特 ^[44] , 对环境控制和无菌操作要求极高, 过程控制自动化程度高, 数据可追溯 ②“三废”涉及低毒性但高盐度废水等, 需深度处理
产业链结构	①超长链 ^[45] : 种植→采收→产地初加工→炮制→制剂→废弃药渣利用 ②周期长, 碳足迹核算需跨越不同时空尺度, 碳汇、碳排多环节交织 ^[5]	①中短链 ^[46] : 原料药合成→制剂→销售 ②周期短, 系统边界可聚焦工业生产阶段, 全链条以碳排放为主, 无明显碳汇	中长链 ^[47] : 细胞库→发酵→纯化→制剂 需关注生物安全等级实验室的特殊能耗, 原料种植碳汇占比小, 常被忽略
数据基础	数据基础薄弱, 高碎片化、高异质性、高不确定性, 缺乏行业背景数据 ^[48]	原料生产数据(如能耗、物耗)可通过分布式控制系统 ^[49] 实时采集, 行业数据库(如 Ecoinvent)完善	发酵过程数据(如溶氧量、温度)自动化采集程度高 ^[47] , 国际通用数据库(如 Bio LCA)支撑碳足迹核算
核算模型	无行业统一标准 ^[5] , 通用 LCA 模型未考虑“药材道地性-碳汇”“炮制火候-能耗”等关联, 需结合地理信息技术等开发适配中药特性的时空动态模型	有标准与案例 ^[50] 支撑, 可直接套用现有模型, 通过工艺参数输入即可完成核算, 敏感性分析聚焦能源价格波动	有指南和部分案例 ^[39,51] 参考, 需整合代谢网络模型与 LCA, 评估生物过程的碳代谢路径

用量、灌溉水量等数据可能因农户记忆偏差或统计口径不一而失真。收集企业生产数据时, 通常只能得到全厂、整个车间或工艺一段时间内所有产品的总体数据记录, 具体产品的数据往往难以直接测量或获取, 缺乏面向中药产业链多环节的低成本、高精度实时监测技术。

4.1.2 多源异构数据融合困难重重 多源异构数据融合是中药碳足迹核算中的关键挑战之一。中药产业链涵盖多个环节, 涉及农业、工业不同类型的生产活动和数据类型, 这些数据在精度、时空尺度等方面存在差异, 给数据融合带来一定难度。例如, 中药材生长受地域、气候、土壤条件影响显著, 不同产地、不同年份和采收季节的药材种植数据差异大; 加工环节涉及传统炮制工艺与现代工艺技术设

备的结合, 既有传统经验操作的定性描述, 又有现代设备的定量数据, 数据标准不统一。此外, 环境监测数据、能源消耗数据与生产过程数据在时间与空间维度上难以精准匹配, 给数据融合带来极大挑战。如何将这些不同来源、不同类型的碳排放数据进行融合, 建立统一的数据模型, 是实现中药碳足迹准确核算的关键。

4.1.3 数据缺失与不确定性处理 在中药碳足迹核算过程中, 由于部分环节数据难以获取或记录不完善, 常常会出现数据缺失的情况。此外, 由于中药生产过程复杂, 受到多种因素的影响, 如气候变化对中药材种植的影响、生产工艺的波动等, 导致碳排放数据存在一定的不确定性。部分研究用通用农业种植碳排放系数替代特定中药材种植排放, 导

致核算结果偏离实际。针对数据缺失与不确定性，需要采用科学合理的方法进行处理，如参考同类企业的平均数据、利用统计学方法进行估算、开展敏感性分析等，以降低数据缺失和不确定性对核算结果的影响，不断探索数据补偿机制，提高核算结果的可靠性和可信度。

4.1.4 碳排放数据实测核验不足 中药碳排放的实测核验也面临诸多挑战。技术层面，连续在线监测（continuous emission monitoring system, CEMS）因设备成本高，仅覆盖极少部分中药企业固定排放源；便携式检测法则受工艺波动和复杂介质干扰，误差率较高；静态箱法虽可量化种植固碳与药渣降解排放，但受限于山地地形和采样频率，数据代表性不足；工业端智能电表缺乏药材品类关联计量模块^[52-53]。应用层面，企业多沿用政府间气候变化专门委员会（intergovernmental panel on climate change, IPCC）默认排放因子估算能耗排放，忽视设备老化、地域能源结构差异的影响。突破路径需聚焦三点：一是分场景部署监测技术，如对锅炉/灭菌设备等强制安装CEMS，运输车辆加装车载诊断系统（on-board diagnostics, OBD），种植基地布设物联网气象站；二是开发工艺耦合校验模型，如建立“溶剂消耗-碳排放”实时反演算法、“炮制火候-碳排放”耦合关系；三是推动产学研实测数据库共建，通过实测数据积累，校准道地药材固碳系数。行业尚未出台分品种实测规范，第三方核验案例不足，亟需建立“区块链+智能传感器”实测体系与行业验证标准^[54]。

4.2 系统边界的确定问题

确定合理的系统边界是中药碳足迹核算的关键步骤之一。中药材种植环节作为中药产业链的起始阶段，其碳排放主要来源于土壤碳排放、化肥农药施用、灌溉、农用机械使用等方面。同时，中药材种植过程还存在一定的碳汇作用，光合作用吸收二氧化碳，碳汇量的准确估算对于评价中药材种植环节的净碳排放具有重要意义。中药材生长的固碳能力受品种、生长周期、种植密度等因素影响，目前缺乏统一的测量与计算标准，导致种植环节碳平衡核算存在较大不确定性，碳源与碳汇界定模糊。

中药加工、炮制、制剂等环节的碳排放主要源于能源消耗（如电力、煤炭、天然气等）以及原材料加工过程中的化学反应等，核算比较复杂。在炮制过程中，不同炮制方法（如蒸、炒、炙）的能源消耗与碳排放差异显著，辅料使用（如酒、醋）的

碳排放溯源困难。制剂环节涉及提取、浓缩、干燥等工序，各工序间物料循环与能量回收利用情况复杂，难以准确划分碳排放责任。多产品系统面临分配困境，如共线生产车间的能耗分摊、联产品（如中药提取物与残渣肥料）的碳足迹分配不易清晰界定。需遵循相关性、完整性、一致性、准确性和透明性的基本分配原则，建议企业优先使用物理化学性质/关系进行分配，当物理化学分配方法难以实现时，可根据各产品的经济价值比例进行分配。此外，废弃物处理环节的碳排放常被忽视，如药渣、废水处理过程的能耗与温室气体排放未得到充分考量。

中药产业链中不同环节的碳足迹贡献存在差异，准确分析各环节的贡献率有助于识别碳减排的关键环节，为制定针对性的减排措施提供依据。确定系统边界时，需综合考虑中药产品的生命周期，即从原材料获取到加工生产、运输、使用及废弃处置的全过程，确保碳足迹核算的全面性和系统性。同时，还需根据具体的研究目的和应用场景，对系统边界进行合理调整和界定，以满足实际需求。

4.3 模型与参数选择问题

4.3.1 模型适配性缺陷 构建适配中药特性的核算模型对于准确核算中药碳足迹至关重要。与化学药和生物药不同，中药具有生物多样性依赖与工艺非线性等，通用碳足迹核算模型未充分考虑中药产业特性，难以捕捉这种生物源头的异质性，缺乏中药特有单元过程，未考虑产业链上下游各环节时间和空间因素差异，无法完全适配中药产业的实际情况。因此，根据中药产业特点，对现有模型进行改进和优化，建立适用于中药不同产品类型、不同生产工艺的时空动态LCA核算模型体系十分必要。

4.3.2 背景数据库缺失 关键参数的确定与敏感性分析是确保核算结果准确性和可靠性的重要环节。中药碳足迹核算涉及众多参数，受生产条件、设备性能、操作人员经验等因素影响，可能存在较大波动。在生命周期清单分析中，关键参数通常包括原辅料消耗量、能源消耗量及碳排放因子等。

碳排放因子的选择应充分考虑中药生产过程中使用的不同能源类型以及不同工艺环节的碳排放特征，采用具有代表性的行业相关数据值。针对参数选取和估计存在的不确定性开展敏感性分析以帮助评估参数变化对核算结果的影响程度，识别敏感性较高的参数，为数据收集和参数选取提供方向。

行业背景数据库建立是中药碳足迹核算的重

要支撑。目前，中药行业碳足迹核算缺乏前端基础数据，行业碳排放因子数据尚未建立，本土化数据不足，这给中药碳足迹核算带来了一定困难。通过建立中药行业背景数据库，可以收集和整理中药产业链各环节相关数据，为中药碳足迹核算提供丰富的数据支持，提高核算结果的准确性和可靠性。

5 结语与展望

5.1 理论体系亟待本土化适配

现行国内外 LCA 标准只提供基本理论框架，在中药产业应用时存在显著盲区，需结合产业特性，在原料地域性、炮制工艺特殊性等方面细化核算规则，构建融合“药材-炮制-制剂”特性的核算边界划分准则，针对中药碳足迹的非线性特征，考虑动态纳入道地药材碳汇贡献、炮制过程火候-能耗-药效耦合关系等时空异质因素，突破传统线性 LCA 模型，发展基于能-质分析的新型核算范式。

5.2 数据与方法瓶颈制约行业发展

当前中药碳足迹核算实践中，数据来源分散、多源异构数据融合技术滞后，使得核算结果准确性与可靠性不足。全产业链缺少标准化数据采集流程，关键参数缺失与背景数据库不完善，严重制约核算方法的标准化与推广应用，亟待建立统一的数据收集与质量控制体系，开发有效的数据融合和不确定性处理方法。

5.3 产业特殊性放大核算复杂度

中药的生物源碳流动与地域关联碳排放构成独特核算挑战，产业链的长周期特性、季节性等，要求开发跨时间尺度的动态核算工具。时空异质特性增大了碳足迹核算复杂程度，构建适配中药特性的核算模型，并建立完善的行业背景数据库迫在眉睫。表 2 简要总结了当前中药碳足迹核算关键问题与解决路径。

表 2 中药碳足迹核算关键问题与解决路径

Table 2 Key issues and solution paths in carbon footprint counting of traditional Chinese medicine

关键问题	核心瓶颈	突破路径	技术/政策工具
数据“三高三缺”	种植碳汇难计量、多源数据 难融合	构建全链数据库	区块链溯源、物联网监测、遥感 技术
系统边界模糊	种植净碳排不明、药渣处置 复杂	制定行业细则	碳汇计量模型、分配规则标准化
模型适配性缺陷	线性 LCA 难处理“能-质- 效”耦合	开发动态 LCA 模型	数字孪生、知识图谱集成、地理 信息技术
行业标准缺失	无中药行业相关核算标准	推动碳标签认证	纳入绿色工厂评价体系

5.4 展望

中药绿色制造碳足迹核算作为推动中医药产业低碳转型的关键技术，在理论框架构建与实践探索中取得了初步进展。展望未来，完善核算体系需从多维度协同突破。

在数据层面，应加快建立覆盖全产业链的中药行业标准化数据库，整合企业生产数据、科研监测数据及政府统计数据，开发智能化数据采集与融合技术，降低数据不确定性，可考虑首先建立省级中药碳排放因子库等。在方法层面，亟需构建适配中药特性的核算模型，结合数字孪生技术动态模拟中药生产过程的碳流路径，明确各环节碳排放责任，开发融合动态碳汇、时空异质性的 LCA 扩展模型和中药专用软件模块。在标准与政策层面，需推动行业核算标准的统一，将碳足迹评价纳入中药绿色制造认证体系，引导企业开展碳标签认证、碳减排

实践，积极申报零碳工厂等。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 国家发展改革委等关于《完善碳排放统计核算体系工作方案》的通知 [EB/OL]. (2024-10-08) [2025-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6983052.htm.
- [2] 国务院办公厅关于印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》的通知 [EB/OL]. (2024-08-02) [2025-7-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_696080.htm.
- [3] 慈志敏, 余强, 马鸿雁, 等. 基于生命周期评价的中药产品碳标签构建模式探讨 [J]. 中药与临床, 2025, 16(3): 68-72.
- [4] 国务院办公厅发布《关于提升中药质量促进中医药产业高质量发展的意见》 [J]. 职业, 2025(4): 28.
- [5] 董孝斌, 肖晓民, 乔宇萱, 等. 碳中和背景下中药产业

- 高质量发展研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 98-107.
- [6] 边少卿, 杨姗姗, 杨秀, 等. 国际绿色贸易壁垒形势下完善我国碳核算体系的对策研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 96-107.
- [7] 王科, 吕晨. 全球和中国碳市场回顾与展望 (2025) [J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2025, 27(2): 19-36.
- [8] 慈志敏, 张定堃. 碳足迹管理赋能中药产业绿色发展 [N]. 中国中医药报, 2025-02-06(7).
- [9] 绿色制造 术语: GB/T 28612—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 1.
- [10] 谭琳, 万鑫浩, 王学成, 等. 新质生产力视角下的中药绿色数字化制造实现路径研究 [J]. 中草药, 2025, 56(5): 1782-1792.
- [11] 杨东印, 王子千, 万鑫浩, 等. 面向“双碳”目标下中药生态精细制造模式的选择与思考 [J]. 中国中药杂志, 2024, 49(24): 6549-6557.
- [12] 郭立玮, 党建兵, 陈顺权, 等. 关于构建中药绿色制造理论与技术体系的思考和实践 [J]. 中草药, 2019, 50(8): 1745-1758.
- [13] Pandey D, Agrawal M, Pandey J S. Carbon footprint: Current methods of estimation [J]. *Environ Monit Assess*, 2011, 178(1/2/3/4): 135-160.
- [14] 慈志敏, 余强, 马鸿雁, 等. 双碳背景下中药制药企业碳足迹产生环节与核算模型 [J]. 中草药, 2022, 53(24): 7980-7988.
- [15] Satta M, Passarini F, Cespi D, et al. Advantages and drawbacks of life cycle assessment application to the pharmaceuticals: A short critical literature review [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-33964-w.
- [16] 刘春霞, 王璐, 张岩, 等. 产品碳足迹标准体系发展现状、挑战与建议 [J]. 中国标准化, 2025(9): 46-51.
- [17] 工业和信息化部等关于印发“十四五”医药工业发展规划的通知 [EB/OL]. (2021-12-22) [2025-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/31/content_5671480.htm.
- [18] 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.
- [19] 李晶莹, 马龙飞, 张红娟, 等. 生命周期评价方法在医药领域的应用现状与研究进展 [J]. 化工进展, 2024, 43(5): 2851-2861.
- [20] Ray A, Sharma S, Sadasivam B. Carbovigilance: Curtailing the global pharmaceutical carbon footprint [J]. *Future Healthc J*, 2021, 8(3): e683-e685.
- [21] Belkhir L, Elmeligi A. Carbon footprint of the global pharmaceutical industry and relative impact of its major players [J]. *J Clean Prod*, 2019, 214: 185-194.
- [22] Piffoux M, Le Tellier A, Taillemite Z, et al. Carbon footprint of oral medicines using hybrid life cycle assessment [J]. *J Clean Prod*, 2024, 475: 143576.
- [23] Yang K X, Lv B H, Shen H Z, et al. Life cycle assessment of pharmaceuticals: The ciprofloxacin hydrochloride case [J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2021, 26(1): 64-75.
- [24] Zhang Y W, Wang Y B, Zhang J W, et al. Research on waste gas treatment technology and comprehensive environmental performance evaluation for collaborative management of pollution and carbon in China's pharmaceutical industry based on life cycle assessment (LCA) [J]. *Sci Total Environ*, 2024, 919: 170555.
- [25] Renteria Gamiz A G, Dewulf J, De Soete W, et al. Freeze drying in the biopharmaceutical industry: An environmental sustainability assessment [J]. *Food Bioprod Process*, 2019, 117: 213-223.
- [26] 辛春林, 李岩, 曹已晴, 等. 基于 CiteSpace 的可视化分析我国碳足迹研究现状、热点与趋势 [J]. 北京工业大学学报: 自然科学版, 2025, 52(1): 122-132.
- [27] 谢明辉, 满贺诚, 段华波, 等. 生命周期影响评价方法及本地化研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2148-2156.
- [28] 慈志敏, 欧建祥, 余强, 等. 基于生命周期评价的中药提取物碳足迹核算研究: 以某企业的桑叶提取物为例 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(1): 120-129.
- [29] Shangguan D Y, Yang L B, Wang J, et al. Case study on carbon emission of a traditional Chinese medicine pharmaceutical enterprise toward carbon neutrality [J]. *J Clean Prod*, 2024, 450: 141600.
- [30] 新浪财经. 达仁堂: 2023 年度可持续发展报告 [N/OL]. (2024-03-30) [2025-07-14]. https://vip.stock.finance.sina.com.cn/corp/view/vCB_AllBulletinDetail.php?stockid=600329&id=9923486.
- [31] 新浪财经. 江中药业获全省中药行业首张碳足迹评价证书 [N/OL]. (2024-09-23) [2025-07-14]. <https://finance.sina.com.cn/stock/relnews/cn/2024-11-06/doc-incvaiqs2251796.shtml>.
- [32] 宋竹田. 中药提取过程中乙醇的回收和套用 [J]. 化工与医药工程, 2016, 37(6): 34-36.
- [33] 段金廒, 宿树兰, 郭盛, 等. 面向“双碳”目标的中药资源全产业链废弃物及副产物循环利用与循环经济产业发展策略 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(17): 4545-4551.
- [34] 生态环境部关于发布2022年电力二氧化碳排放因子的公告 [EB/OL]. (2024-12-26) [2025-7-10]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202412/t20241226_1099413.html.
- [35] 国家药品监督管理局数据查询 [EB/OL]. (2025-07-01)

- [2025-07-04]. <https://www.nmpa.gov.cn/datasearch/home-index.html>.
- [36] 麦麦提敏·麦提萨伍尔, 赖梦亭, 段金廒, 等. 基于文献计量学和专利分析的板蓝根研究现状剖析及产业化前景展望 [J]. 中草药, 2024, 55(2): 563-574.
- [37] 秦文清. 中国中药资源分布与地理环境 [M]. 北京: 世界图书出版公司, 2024: 393.
- [38] 涂小云, 邹峥嵘, 余小辉. 药物常识 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022: 259.
- [39] 周爱萍. 生物治疗药物和生物类似药研究进展 [J]. 中国新药杂志, 2017, 26(3): 296-299.
- [40] 张智杰, 谭盛齐. 中药生产过程 MES 系统应用研究 [J]. 中国战略新兴产业, 2025(5): 20-22.
- [41] 龙旭, 卢莹磊, 王珂莹, 等. 中药固体废弃物的能源化发展: “双碳”经济转型中的机遇与挑战 [J]. 中草药, 2025, 56(6): 1877-1887.
- [42] 虞正烨, 高扬. 阿莫西林的合成方法综述 [J]. 山东化工, 2020, 49(13): 45-47.
- [43] Sahoo T, Panda J, Sahu J, et al. Green solvent: Green shadow on chemical synthesis [J]. Curr Org Synth, 2020, 17(6): 426-439.
- [44] 方伟杰, 黄永焯, 潘洪辉, 等. 生物药在生产过程中的稳定性问题及解决方案 [J]. 国际药学研究杂志, 2017, 44(11): 1012-1018.
- [45] 刘承志. 浅谈中药饮片成本核算与管理 [J]. 现代营销, 创富信息版, 2018(32): 67.
- [46] 郭起坤. 化学药品原料药制备行业环境影响评价研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(12): 164-165.
- [47] 罗合春. 生物制药工程技术与设备 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2023: 257.
- [48] 蒋明睿. 中药资源如何循环利用实现绿色发展? [N]. 新华日报, 2023-07-12(12).
- [49] 陆尧怡. 双碳目标背景下企业 ESG 信息披露实践及启示: 以恒瑞医药为例 [J]. 国际商务财会, 2023(7): 36-39.
- [50] Parvatker A G, Tunceroglu H, Sherman J D, et al. Cradle-to-gate greenhouse gas emissions for twenty anesthetic active pharmaceutical ingredients based on process scale-up and process design calculations [J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2019, 7(7): 6580-6591.
- [51] 曹已晴. 基于 LCA: GLSS 耦合模型的医药产品碳足迹评价及其生产流程优化研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [52] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220-2235.
- [53] 邹建文, 黄耀, 郑循华, 等. 基于静态暗箱法的陆地生态系统-大气 CO₂ 净交换估算 [J]. 科学通报, 2004, 49(3): 258-264.
- [54] 杨珂, 郭庆雷, 李达, 等. 基于区块链的隐私保护碳核算模型 [J]. 信息安全研究, 2024, 10(11): 1036-1042.

[责任编辑 王文倩]