中药关键生产单元“质-能-碳”协同评价与节能降碳策略研究进展

宋利东[1]，杨怡琴[1,2]，张卓楠[1]，王雅琪[1]，伍振峰[1,3]，易　兵[4]，张定堃[2]，慈志敏[2]，黄心琳[1]，杨　明[1,2,3]，王学成[1*]

1. 江西中医药大学 现代中药制剂教育部重点实验室，江西 南昌　330004
2. 成都中医药大学药学院，四川 成都　611137
3. 经典名方现代中药创制全国重点实验室，江西 南昌　330004
4. 江西赫柏康华制药设备有限公司，江西 南昌　330200

摘　要：在“双碳”目标和中药制造绿色转型背景下，中药生产面临工艺链条长、能源消耗集中、碳排放来源复杂及质量约束突出等问题。围绕碳排放形成机制、核算方法适配、关键单元协同评价和碳中和路径对相关研究进行主题式梳理。研究表明，提取、浓缩、干燥是中药生产能耗与碳排放的重点环节，蒸汽、电力、公用工程、溶剂及废弃物处置是主要排放来源。现有研究已逐步采用排放因子法、生命周期评价和单位能耗指标开展评价，但仍存在边界不统一、功能单位不清、实测数据不足和质量指标融入不充分等问题。未来应加强过程数据采集，完善“质量-能耗-碳足迹”耦合指标，并结合先进生产设备和智能控制等技术，推动中药制造由碳足迹核算向过程诊断和碳中和管理转变。

关键词：中药生产；能耗评价；碳足迹；质量约束；节能降碳

中图分类号：R283　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2026)21 - 8777 - 18

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.21.032

Research progress on “quality-energy-carbon” synergy evaluation and energy-saving and carbon reduction strategies for key production units of traditional Chinese medicine

SONG Lidong[1], YANG Yiqin[1, 2], ZHANG Zhuonan[1], WANG Yaqi[1], WU Zhenfeng[1, 3], YI Bing[4], ZHANG Dingkun[2], CI Zhimin[2], HUANG Xinlin[1], YANG Ming[1, 2, 3], WANG Xuecheng[1]

1. Key Laboratory of Modern Preparation of Traditional Chinese Medicine, Ministry of Education, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China
2. School of Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China
3. National Key Laboratory of Creation of Modern Traditional Chinese Medicine from Classic Formulae, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China
4. Jiangxi Hebai Kanghua Pharmaceutical Equipment Co., Ltd., Nanchang 330200, China

Abstract: Against the backdrop of the “dual carbon” goals and the green transformation of traditional Chinese medicine manufacturing, traditional Chinese medicine production is facing several practical problems, such as long process chains, concentrated energy consumption, complex carbon emission sources, and prominent quality constraints. This paper reviews the related studies from four aspects: carbon emission formation mechanism, applicability of accounting methods, collaborative evaluation of key unit processes, and carbon neutrality pathways. The results show that extraction, concentration, and drying are the main energy-consuming and carbon-emitting processes in traditional Chinese medicine production. Steam, electricity, public utilities, solvents, and waste treatment are the major emission sources. At present, emission factor method, life cycle assessment, and unit energy consumption indicators have been gradually applied in related studies. However, there are still some problems, including inconsistent system boundaries, unclear

收稿日期：2026-06-29

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFC3506903）；江西省重点研发计划项目（20243BCC31010）；中央引导地方科技发展资金项目（2026QZZZBSXM006）

作者简介：宋利东，硕士研究生，研究方向为中药药剂学。E-mail: s2581692287@163.com

***通信作者：**王学成，副教授，博士生导师，从事中药制剂工艺与装备研究。E-mail: wangxcdd@126.com

functional units, insufficient measured data, and inadequate integration of quality indicators. In the future, it is necessary to strengthen the collection of process data, improve the coupled indicators of quality-energy consumption-carbon footprint, and combine technologies such as advanced production equipment and intelligent control technologies, so as to promote the transformation of traditional Chinese medicine manufacturing from carbon footprint accounting to process diagnosis and carbon neutrality management.

Key words: traditional Chinese medicine production; energy consumption evaluation; carbon footprint; quality constraint; energy saving and carbon reduction

随着我国碳达峰碳中和标准计量体系建设的持续推进，生产过程的能耗评价与碳足迹核算受到广泛关注[1]。中药生产涉及提取、浓缩和干燥等多个关键单元，能源消耗与工艺条件、产品质量密切相关。如何在保障产品质量的前提下实现节能降碳，已成为中药制造绿色转型需要关注的重要问题。

目前，中药生产已开展能耗评价、碳足迹核算及节能技术研究，但仍存在核算边界与功能单位不统一、过程数据不足及质量指标关联不充分等问题，限制了不同工艺的评价与比较。本文围绕中药关键生产单元，梳理碳排放形成机制、能耗与碳足迹评价方法，分析质量约束下的协同评价指标，总结相关节能降碳策略，以期为中药生产过程诊断及工艺优化提供参考。

1 中药生产碳排放形成机制与质量约束特征

1.1 中药制造低碳转型的现实需求

在“双碳”目标持续推进的背景下，中药制造业的低碳转型已不再停留于宏观倡议层面，而是逐渐落实到企业生产过程、能源利用方式和产品碳足迹管理之中。近年来，国家围绕节能降碳、产品碳足迹核算、绿色工厂建设和医药工业绿色发展陆续出台相关政策，对制造企业的能源消耗、生产排放、供应链管理和绿色化水平提出了更明确的要求[1-3]。对于中药制造而言，这种要求具有较强的现实针对性。其生产过程通常涉及药材前处理、提取、浓缩、醇沉、干燥、制剂成型以及公用工程等多个环节，工艺链条较长，热能和电能消耗集中，废水、药渣和包装材料等环境负荷也不容忽视[4]。因此，开展能耗评价与碳足迹核算具有必要性。其可以帮助企业识别高耗能、高排放环节，明确工艺优化和设备改造方向。对于中药产业而言，建立符合生产实际的能耗-碳排放评价体系是推动绿色制造和高质量发展的重要基础。

1.2 中药生产碳排放形成机制

碳排放的形成本质上是生产活动消耗能源、使用物料并处理废弃物时，将温室气体释放到环境中的过程[5]。最常见的来源是含碳燃料燃烧。煤、天然气、燃油等燃料在锅炉、加热炉或动力设备中被氧化，燃料中的碳转化为二氧化碳。电力和蒸汽虽然在车间使用时不一定直接排放烟气，但它们往往需要在发电厂或供热端消耗化石能源，会形成间接碳排放。中药材种植阶段会使用化肥、农药和农机燃油等，这些投入在生产、运输和施用过程中已经带来碳负荷。进入制药环节后，排放数量与来源相比于种植过程会更加密集和庞大。提取通常利用蒸汽进行升温和恒温浸提，而浓缩则需要较多的电力或者蒸汽去蒸发水分，干燥需要持续供热、抽真空或鼓风产生大量的电力消耗[6-8]。蒸汽、电力和燃料供热成为中药生产碳排放的主导来源。

其中，直接排放主要来自厂内燃料燃烧、锅炉供汽、污水处理和部分废气治理过程。例如，企业自建锅炉燃烧天然气或煤制备蒸汽，会直接释放 CO_2；高浓度有机废水在处理过程中，还可能产生 CH_4 和 N_2O[9]。若醇提、醇沉、浓缩或废液暂存过程中出现有机溶剂挥发，则更多表现为废气和无组织排放问题[10]。间接排放则主要来自外购电力与蒸汽、原辅料和包装材料的生产，以及仓储和外部废弃物处置。如洁净空调、空压系统、冷库、纯化水系统等公用工程长期运行会持续消耗电力[11-12]；包装材料在生产阶段本身已有隐含碳排放；药材和成品运输还会带来燃油消耗。药渣、污泥和废溶剂的回收与处理也会因处置方式不同形成额外环境负荷[13]。

1.3 中药生产质量约束对低碳评价的影响

中药制剂的质量并非单一含量指标所能完全表征，而是由药材来源、饮片加工、提取、分离、浓缩、干燥和制剂等环节共同决定。以中药配方颗粒为例，其由单味中药饮片经水提、分离、浓缩、干燥、制粒而成，制备过程既改变物料形态，也影响药效物质的转移和保留。杨鹤年等[14]研究发现，五味子配方颗粒采用 70%乙醇提取可提高五味子酯甲、五味子甲素和五味子乙素等成分含量，但其溶媒选择与水煎传统汤剂的一致性存在差异；茯苓配方颗粒中部分成分在不同厂家及批次之间也存

在差异。工艺条件、原料来源和生产过程改变均可能影响质量一致性。

中药干燥过程直接关系产品质量和药物疗效，升高温度虽可提高干燥速率，却可能导致物料表面结壳、内部水分迁移受阻，并加剧有效成分降解。巨浩羽等[15]阐述了西洋参变温干燥、枸杞阶段干燥以及药片阶段调湿干燥等案例，认为节能并不等于简单降低热量输入或缩短加工时间，而应在色泽、复水性、有效成分保留和终点含水率满足要求的前提下优化干燥制度。王永香等[16]将白利度、密度、比热容等随浓缩变化的物性参数纳入能耗计算，同时指出在浓缩过程中能耗会受起泡程度和物性变化影响，不能简单以理论能耗最低作为唯一判断依据。由此可见，中药生产低碳评价应从产品的各项指标达标后，再比较不同设备和工艺的能耗与碳足迹。盲目追求低能耗可能造成有效成分损失、批间差异扩大或产品返工报废，反而削弱真实减碳效果。质量约束不是低碳评价的附加条件，而是判断中药绿色制造是否成立的前提。

1.4 从排放核算到过程诊断的研究转向

从排放核算转向过程诊断，是中药生产低碳研究由结果表征走向机制解析的必然延伸。排放核算能够明确企业、产品的碳排放水平，为低碳评价提供基础数据，但其结果多表现为总量、强度或阶段贡献，难以直接回答高排放形成于何处？受哪些工艺因素驱动？应优先改造哪些生产单元？中药生产过程具有多单元串联、能源介质多样、批次波动明显等特点，不同制剂工艺以及公用工程之间存在能量流、物料流和运行参数的耦合关系。仅依赖排放清单，容易停留在统计层面的减排判断，难以形成针对设备、工艺和运行管理的优化方案。

过程诊断的价值在于将碳排放结果进一步分解到具体工序、设备状态和关键运行参数之中，识别蒸汽、电力等能源消耗的形成原因，区分能源结构影响、设备效率不足、工艺参数不合理等不同来源[17]。通过对过程能耗与碳足迹进行分析，将评价结果服务于工艺优化、设备替代和过程控制。Kanchiralla 等[18]在食品行业能源终端用途研究表明，生产过程贡献了食品工业大部分能源消耗，热加工等单元过程具有更高的能源与 CO_2 排放强度。中药行业也是如此，同时生产过程的减排空间往往并不均匀分布于所有环节，而是集中于若干高耗能或低效率单元。将核算结果落实到过程诊断才能明确减排优先级，避免泛化的节能建议，提高低碳技术应用的针对性和可验证性。

2 中药生产碳足迹核算与能耗评价方法适配

2.1 核算对象、系统边界与功能单位

碳排放核算与能耗评价首先应明确核算对象、系统边界和功能单位。按照现有的综合能耗计算通则，能耗评价对象可以是用能单位整体，也可以是次级用能单位或其组成部分[19]。Ma 等[20]针对能源密集型制造业构建了基于边云协同和大数据分析的综合可持续基准，用多层级生产数据分析经济增长与碳排放脱钩关系，将评价对象划分为企业层、车间层和设备层 3 个层级，并通过合作企业的实际生产数据进行验证。面对中药生产的特殊性，可形成企业、车间、工序和设备四类对象。企业层面适用于评价中成药生产企业报告期内的综合能耗；车间或工序层面适用于提取、浓缩、干燥、制剂、包装等环节的能效比较；设备层面则适用于单台提取罐、浓缩器、干燥箱、制粒机等单机评价。碳排放核算的组织层面对象以报告主体为核心，报告主体通常为具有温室气体排放行为的法人企业或视同法人的独立核算单位[21]。单位产品层面的碳排放评价则应与单位产品能耗评价保持一致，以企业或装置生产单位合格产品，或加工、处理单位原料所对应的能源消耗和二氧化碳排放为对象[22]。

企业综合能耗边界多覆盖主要生产系统、辅助生产系统和附属生产系统。同时明确排除基建、技改等项目建设用能及与生产无关的用能，保证边界与生产活动相对应[19]。碳排放核算边界可在能耗边界基础上进一步识别排放源，其核算边界包括主要生产系统、辅助生产系统以及直接为生产服务的附属生产系统[21]。除企业边界外，测算产品碳足迹时需要纳入中药材种植等上游阶段，中药生产生命周期排放清单的构建应从输入、系统边界、输出 3 个方面统筹考虑，如图 1 所示。

功能单位是中药生产低碳评价中最需要明确的部分。企业层面碳排放核算的基础是报告主体和报告期，结果通常表示为报告期温室气体排放总量，单位为 tCO_2e，政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）报告或学术文献中多用 tCO_2-eq。Shangguan 等[23]对上海上药杏灵科技药业股份有限公司进行碳足迹核算，核算范围为青浦中药材生产基地，结果显示该基地 2021 年总碳排放量为 8 416.85 tCO_2-eq。企

业层面能耗评价则表示为报告期综合能耗，单位为 tce。陈玉芙等[24]对光明乳业环境、社会和治理（environmental, social and governance，ESG）信息披露进行案例研究，其中光明乳业能源消耗量由 2020 年 84 080 tce 增至 2022 年 91 886 tce。对于产品或工序比较时，应采用单位产品或单位作业量作为功能单位，现有的综合能耗准则将单位产品综合能耗定义为统计报告期内综合能耗与合格产品产量、作业量、工作量或服务量的比值，并说明产品可以是合格的最终产品或中间产品[19]。Bouchier 等[25]在 2025 年关于药品片剂制造生命周期评价的研究，将功能单位设定为 1 kg 包衣片剂，并进一步使用 $kgCO_2$-eq/kg 片剂，即每 kg 符合规格片剂的碳排放。

2.2　碳足迹核算方法的中药生产过程适配性

目前已有文献总结了关于碳足迹核算的具体方法，如投入产出法、排放因子法、质量平衡法、全生命周期法和实测法等[24]。各类方法在目前的使用过程中都存在一定的优缺点，见表 1。

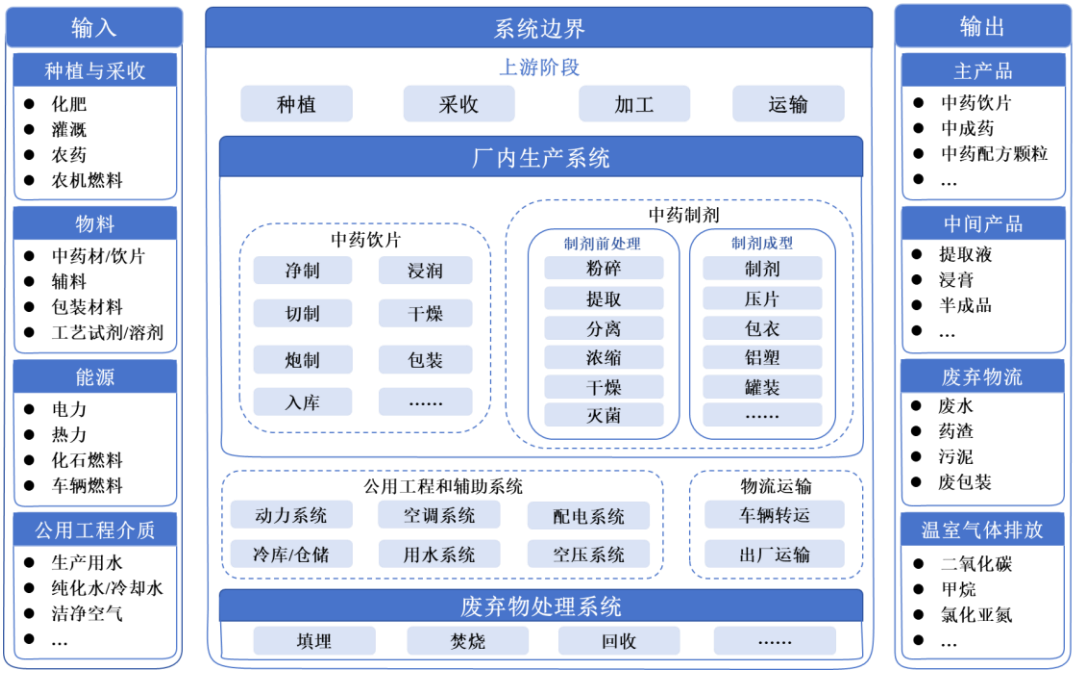


图 1　中药产品生命周期排放清单

Fig. 1　Life-cycle emission inventory of traditional Chinese medicine products

表 1　碳足迹核算方法及其适用场景

Table 1　Carbon footprint accounting methods and their application scenarios

方法	优点	缺点	适用场景
投入产出法	基于经济投入产出表，能够从行业或供应链层面估算间接碳排放	投入产出表间隔数年发布，数据滞后；部门分类与具体产品不匹配，难以评估具体工艺	适用于制药产业链上游部分和外购服务等间接排放的宏观识别[26]
排放因子法	简单明确，普及度高；数据需求不高，适合缺乏详细过程数据的情况	排放因子受技术、工艺、区域影响，可能导致偏差；无法反映物料流动和直接排放	适用于中药企业电力、蒸汽、天然气、燃料等排放核算[27]
质量平衡法	基于物质守恒定律，准确反映过程碳排放，有较强的科学性	需要完整的物料流、含碳量和回收率数据，对数据完整性要求较高	溶剂回收、燃料燃烧、废渣处置等关键物料流核算[28]
实测法	直接监测排放源，结果可靠，适合动态监测	设备投入和维护成本较高，难以覆盖全生命周期和间接排放	适用于锅炉烟气、废气排放、挥发性有机物排放、污水处理排放等关键排放点验证[29]
全生命周期法	过程分辨率高，可识别排放热点，适合工艺优化与产品碳足迹核算	数据采集工作量大，系统边界和数据库选择会影响结果	适用于中药产品碳足迹核算，可识别不同热点单元[30]

目前排放因子法的适用范围相对广泛，适用于中药的复杂生产过程。排放因子法又称排放系数法，是将某一活动或过程的数据乘以对应的碳排放因子，从而计算出温室气体排放量的估计值。排放因子法的计算过程如式（1）所示。

$$E_{CO_2}=\sum_{i=1}^{n}(AD_i\times EF_i) \quad (1)$$

E_{CO_2}为二氧化碳排放当量；AD_i为活动数据，即排放源的消耗量；EF_i为活动数据对应的排放因子

同时排放因子法可以估算单个过程的 CO_2 当量，也可以和全生命周期法相结合去测算中药产品整体碳足迹。例如，慈志敏等[26,30]根据中药企业的生产工序，建立了以排放因子法为基础的核算模型。同时以桑叶提取物为例，将生命周期的核算边界设定为“从摇篮到大门”，覆盖原材料获取、运输和提取物生产阶段，测算得知每生产 1 kg 桑叶提取物的碳足迹约为 154.213 kg CO_2-eq。

目前碳足迹测算方法在实际运用中仍然存在许多问题。就排放因子法而言，该方法的可靠性高度依赖排放因子的地域代表性和时间有效性。现阶段我国已经启动国家温室气体排放因子数据库和产品碳足迹因子数据库建设，并强调优先采用可追溯的实测数据、政府官方数据、行业经验值等[2]。但目前数据库建设重点仍集中于基础能源、大宗原材料和交通运输等领域，在中药生产的原料端、工艺端和辅助过程的数据存在系统性不足[31]。原料端涉及的药材种植和产地初加工等环节碳足迹多受药材本身影响，如产地生态条件、种植方式和贮藏条件等，缺乏本土化和行业化的排放因子进行数据统计。工艺端包括多个单元过程，除相关电力与蒸汽的消耗以外，特定溶剂的使用会存在一定程度的碳足迹，在此方面并未有明确的排放因子予以计算。在辅助与末端治理过程中，辅料和包装材料缺乏专有排放因子；清洗废水、药渣和溶剂废液等中药生产囊括的特殊部分缺乏相关排放因子的研究。上述过程如果套用其他行业或者通用的数据库，容易弱化中药生产的原料特异性、工艺及地域差异，并增加核算结果的不确定性。后续应在国家产品碳足迹因子数据库框架下，建立面向中药行业的单元过程数据库，重点补充药材来源、溶剂使用、辅料包材和废弃物处理等基础数据。

排放因子法是计算过程排放的重要方法，而生命周期评价则是组织产品碳足迹核算边界、清单和结果解释的基本框架。尽管生命周期能够展现产品在不同生产阶段的排放情况，但是在具体计算中不得不面临着分配的问题。中药企业往往同时生产多个品种，即生产设备如提取罐、浓缩器等会加工多种药材，锅炉、纯化水站、洁净空调系统和污水处理系统等公用工程被多条产品线共同使用。若仅按企业总能耗或车间总能耗直接折算产品碳足迹，容易将不属于该产品的能源和环境负荷纳入核算，导致不同品种之间排放分摊失真。产品生命周期核算标准[32]提出，分配应首先通过过程细分、重新定义功能单位或系统扩展来避免；若不可避免，应优先依据物理关系进行分配，在物理关系无法建立时再采用经济分配或其他合理关系。在食品行业中已有案例运用，如 Guyomarc 等[33]首先把乳品加工系统拆分为不同工序。对于能够明确归属于某一产品的下游工序，直接将该工序的环境负荷归属于该产品；对于仍然服务于多个中间体或产品、无法继续拆分的共用分离工序，再采用分配规则进行分摊。对于中药生产应结合相关标准并借鉴近似行业的处理方法进一步细化产品碳足迹。如对于提取、浓缩、干燥等能够明确归属于某一产品或某一批次的单元过程，将蒸汽、电力、溶剂消耗等直接归到对应产品。对于共用设备和公用工程，采用工艺负荷驱动分配，如锅炉负荷可按蒸汽实测量或使用量进行分配；纯化水站可按实际用水量分配；洁净空调系统可按洁净区面积以及使用时间分配等。

2.3 能耗评价指标与过程数据采集

基础能耗指标是单元过程能耗评价的基础层指标，主要用于表征一定工艺边界内能源输入与生产负荷之间的对应关系。对于中药提取、浓缩、干燥等关键单元可分别采用单位批次能耗、单位投料量能耗、单位蒸发水量能耗和单位脱水能耗等指标，反映不同设备形式、操作参数和生产批次下的能源消耗差异。在中药浓缩研究中，Li 等[34]将单效蒸发过程中单位蒸发水量对应的蒸汽消耗转化为比能耗指标，用于比较浓缩过程能耗水平；郭立玮等[35]指出中药制药属于高能耗、高物耗、以热加工为主的过程工业，浓缩过程能耗评价可结合提取液特征参数和工艺过程数据开展。在干燥领域，比能耗常以干燥设备总能量输入与脱除水分量之比表示，可用于不同干燥方式的能效比较和过程优化[36]。

能源过程数据的可靠性决定了能耗指标的可解释性。中药生产过程不宜仅依赖人工抄表，应依托现场计量仪表、自动化控制系统和实时数据库进

行连续采集。李正等[37]指出传统人工记录存在信息量有限、漏记误记和传递滞后等问题；通过数据集成、数据挖掘和可视化技术，可将工艺参数、物料属性和能耗等数据纳入统一管理，用于生产优化和绿色制造。李越等[38]研究进一步表明，在涵盖中药提取和制剂全流程的工厂内，实时数据库可整合设备、公用介质、传感器件等多源数据，并服务于生产过程实时监控、进行工艺回顾和质量追溯。杨作明等[39]对能耗在线监测平台研究认为，采集层可通过传感器、数据采集器、智能电表、水表、燃气表等实现现场级数据采集，也可与可编程逻辑控制器、分布式控制系统及开放平台通信服务器等控制系统对接；采集数据经清洗、校验和归一化处理后上传至平台，用于能耗实时监控、能效分析和计量器具管理。在此基础上，将能源数据按批次、设备、工序和质量检测结果进行关联，形成从能源输入记录到单位能耗计算、异常波动识别和节能潜力分析的评价链条（图 2）。

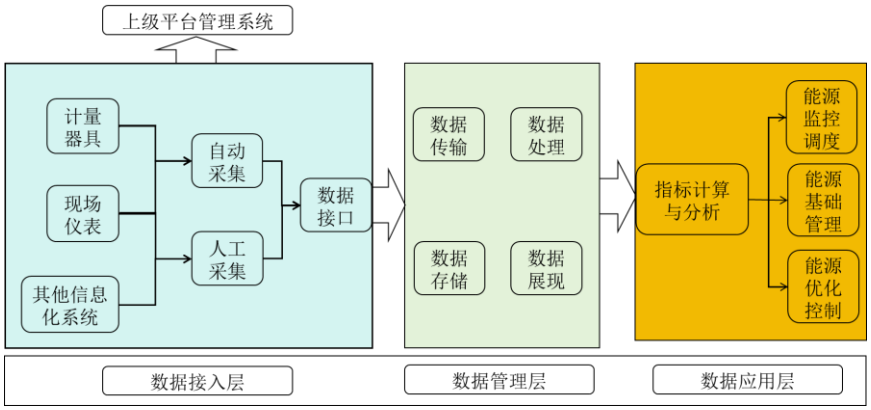


图 2　用能单位能耗在线检测的基本准则

Fig. 2　Basic principles for online energy-consumption monitoring of energy-consuming units

2.4　多源能耗数据结果解释

结果解释是能耗评价和碳足迹核算转化为管理决策的关键环节。能耗评价可以展示不同环节的用能程度，同时可用于表征电力、蒸汽、燃气等能源投入引起的碳排放。产品碳足迹还需纳入原辅料、溶剂损耗、包装材料、运输过程和废弃物处置等非能源排放来源[40]。碳足迹结果不宜仅以总量形式呈现，应结合贡献分析、敏感性分析和不确定性分析进行解释。贡献分析用于识别排放贡献较高的单元过程、能源类型和物料投入，明确不同环节的碳排放热点。和君强等[41]在杨梅鲜果碳足迹研究中将排放来源分解为原料获取、种植过程、包装和仓储阶段，三者贡献率分别为 63.00%、36.31%和 0.69%。敏感性分析通过调整关键参数或情景设定，考察电力排放因子、蒸汽消耗量、工艺得率、溶剂回收率、分摊系数等因素变化对结果的影响，筛选影响碳足迹结果的主要控制变量。Ansar 等[42]以 6 种药物生产过程为例，通过比较能源估算方法、空气处理机组分摊情景和溶剂回收率变化，发现遗漏的辅助系统和单元操作会使碳足迹增加 3%～49%。不确定性分析用于评价核算结果的可靠程度，说明结果是否足以支撑管理决策。陈莎等[43]认为碳足迹评价中不可避免存在监测误差、关键数据缺乏、数据代表性不足、核算模型和分配方法选择等不确定因素，并提出将敏感度分析与基于数据质量指标的蒙特卡洛不确定度分析结合，用于识别影响结果可靠性的关键数据。

3　关键单元过程“质量-能耗-碳足迹”协同评价

在中药生产的过程当中，提取、浓缩和干燥的工艺过程是中药制剂过程中能耗最高，也是最集中的环节[26]。原因是提取浓缩过程消耗大量饱和蒸汽和冷却循环水，蒸汽的大量使用会产生高额热力消耗。浸膏干燥由于物料黏稠、渗透性差，普通干燥时间长也会形成较高能耗。面对上述高耗能、高排放的环节，想要对其进行改进优化就需要进行实际的评价去挖掘更为细致的能源消耗过程以及具体数据。

3.1　提取过程协同评价

中药提取单元承担药材中有效成分、功效物质群和可溶性固形物的转移，是连接饮片属性、工艺条件和中间体质量的关键环节。提取过程的能耗评价应以工艺边界为起点。若研究对象为单台提取设

备，可重点统计提取罐、加热系统、搅拌器、循环泵、输送泵、冷凝器、真空泵和控制系统的能源输入。若研究对象为提取车间，则应进一步纳入公用工程，包括蒸汽系统、冷却水系统、压缩空气系统、纯化水系统和清洗系统。现有中药提取所涉及的活动数据以及质量评价指标[44-45]见表 2。

提取过程的能耗评价应以活动数据为基础。按照现行标准的计算思路，不同能源应先按实物量计量，再折算为统一能量单位或标准煤[46]。提取过程综合能耗可按不同能源的折算系数进行计算，如式（2）所示。参考值见表 3。

$$E_{\text{extract}} = \sum_{j=1}^{n} A D_j \times k_j \quad (2)$$

E_{extract}为提取过程综合能耗（kgce）；AD_j为第j类能源或资源活动数据；k_j为相应能量折算系数或折标准煤系数（kgce/kg）

表 2 不同中药提取方法的活动数据与质量评价指标

Table 2 Activity data and quality evaluation indicators for different extraction methods of traditional Chinese medicines

提取类型	典型方法	活动数据	质量评价指标	对关键质量属性影响
热驱动提取	水提、煎煮、热水提取、回流提取、水蒸气蒸馏	加水量或溶剂用量、液料比、提取温度、升温时间、保温或回流时间、提取次数、蒸汽或热水消耗、冷凝水负荷、搅拌与循环电耗、清洗用水、清洗电耗	出膏率、固形物含量、指标成分含量及转移率、指纹图谱相似度、热敏成分保留率	温度和时间不足时提取不完全；过高或过长易造成热敏成分降解、挥发成分损失及色泽加深
溶剂参与提取	醇提、渗漉、浸渍	乙醇浓度、溶剂用量、溶剂补充量、浸渍时间、渗漉速度、渗漉液收集量、提取时间、过滤负荷、冷凝负荷、溶剂回收能耗、溶剂损耗量、清洗用水	出膏率、指标成分含量及转移率、指纹图谱相似度、残留溶剂、杂质或非目标成分含量	溶剂种类及浓度影响成分选择性；条件不当可能增加杂质共提或残留溶剂
电力强化提取	超声辅助提取、微波辅助提取、微波-超声联合提取	超声功率、微波功率、提取时间、提取温度、液料比、溶剂浓度、温控电耗、冷却电耗、设备运行电耗、清洗用水	提取率、指标成分含量及转移率、指纹图谱相似度、热敏成分保留率、降解产物或活性评价	适宜功率可提高传质效率；功率或时间过大可能引起局部过热、成分降解及结构改变
高压/特殊介质提取	超临界 CO_2 萃取、酶法辅助提取、半仿生提取	萃取压力、萃取温度、CO_2 流量、夹带剂用量、压缩或泵送电耗、酶添加量、酶解 pH、酸碱调节剂用量、酶解温度、酶解时间、分段、pH、搅拌与过滤电耗、清洗用水	萃取率、目标成分含量及转移率、指纹图谱或结构特征、残留溶剂、活性评价	压力、温度及介质组成决定提取选择性；条件变化可能引起组分比例、结构及活性差异

表 3 《中国能源统计年鉴 2024》的折标准煤系数

Table 3 Standard coal conversion coefficients from *China Energy Statistical Yearbook 2024*

能源名称	平均低位发热量	折标准煤系数
燃料油	41 816 kJ·kg^{-1}	1.428 6 kg 标准煤·kg^{-1}
汽油	43 070 kJ·kg^{-1}	1.471 4 kg 标准煤·kg^{-1}
煤油	43 070 kJ·kg^{-1}	1.471 4 kg 标准煤·kg^{-1}
柴油	42 652 kJ·kg^{-1}	1.457 1 kg 标准煤·kg^{-1}
天然气	32 238～38 931 kJ·m^{-3}	1.100 0～1.330 0 kg 标准煤·m^{-3}
热力（当量）	—	0.034 12 kg 标准煤·1 000 kJ
电力（当量）	3 600 kJ·kW^{-1}·h^{-1}	0.122 9 kg 标准煤·kW^{-1}·h^{-1}

根据评价目的可进一步计算单位投料量能耗、单位合格提取液能耗、单位固含量能耗和单位有效成分能耗，如式（3）～（5）所示。

$$SEC_{\text{liquid}} = \frac{E_{\text{extractt}}}{M_{\text{liquid}}} \quad (3)$$

$$SEC_{\text{extract}} = \frac{E_{\text{extract}}}{M_{\text{extract}}} \quad (4)$$

$$SEC_{\text{active}} = \frac{E_{\text{extract}}}{M_{\text{active}}} \quad (5)$$

SEC_{liquid}为单位合格提取液能耗（kgce/kg）；SEC_{extract}为单位固含量能耗（kgce/kg）；SEC_{active}为单位有效成分能耗（kgce/kg）；M_{liquid}、M_{extract}和M_{active}分别为合格提取液质量、固含量和有效成分含量（kg）

对于中药提取液是否合格，应结合《中国药典》、企业内控标准及相关文献确定，可采用固含量、指标成分含量、成分转移率、指纹图谱相似度等指标进行判定。现有相近行业研究已经采用类似思路开展提取过程能耗评价。Kobus 等[47]以山楂果超声辅助提取为对象，记录超声发生器能耗，并将总酚和总花青素作为质量评价指标，进一步计算单位多酚或单位花青素提取能耗。其研究进一步表明，脉冲超声模式在保证或提高活性物质提取效率的同时，可比连续模式节约 20%～51%能量。Chen 等[48]以咖啡银皮超声提取为对象，采用 Taguchi 方

法优化提取时间、超声振幅、乙醇浓度和初始温度，并同步评价总能耗和单位能耗。该研究将超声设备、粉碎机、离心机和真空泵等全部纳入活动数据采集范围，使用功率监测仪测定总电耗，不同工艺条件下总电耗为 0.047 9～0.059 3 kW·h，$SEC_{extract}$ 为 0.006 7～0.009 5 kW·h·g/(mg GAE)，GAE（gallic acid equivalent）为没食子酸当量。

碳足迹测算应在明确系统边界、功能单位和数据质量要求的基础上开展。中药提取过程可作为产品生命周期中的一个单元过程进行核算。若评价目标为车间节能管理，边界可限定为“从投料到提取液出液”；若评价目标为中间体碳足迹，边界应覆盖提取、过滤、溶剂回收、清洗等；若评价目标为产品碳足迹，应将提取单元并入“从摇篮到大门”的产品系统。提取单元碳足迹可采用活动数据乘以排放因子的方式进行分项计算，如式（6）所示。

$$CF=\sum_{i=1}^{n} AD_i \times EF_i \quad (6)$$

*CF*为提取过程碳足迹（$kgCO_2$-eq）

碳足迹结果应与功能单位对应表达，提取单元碳足迹可包括单位合格提取液碳足迹、单位固含量碳足迹和单位有效成分碳足迹，如式（7）～（9）所示。

$$CF_{liquid}=\frac{CF}{M_{liquid}} \quad (7)$$

$$CF_{extract}=\frac{CF}{M_{extract}} \quad (8)$$

$$CF_{active}=\frac{CF}{M_{active}} \quad (9)$$

CF_{liquid}、$CF_{extract}$和CF_{active}分别表示单位合格提取液、单位固含量和单位有效成分的碳足迹（$kgCO_2$-eq/kg）

已有植物活性成分提取相关研究应用了以上研究框架，Seling 等[49]以帚叶内尔塔牧豆荚粉中多酚类物质提取为对象，比较动态浸提、超声辅助提取和微波辅助提取 3 种方法。该研究以总多酚含量、总黄酮含量和抗氧化能力作为质量响应，同时将电力消耗折算为碳足迹，并进一步以单位总多酚含量表示相对碳足迹。Moura 等[50]关于迷迭香精油提取的生命周期进行研究。研究同时设置“1 g 芳香提取物”和“1 g α-蒎烯”2 个功能单位。以 1 g 芳香提取物为功能单位时，鲜样超临界 CO_2 提取的结果较优，能耗和碳排放分别为 290 MJ 和 15 $kgCO_2$-eq；干样水蒸气蒸馏较优，分别为 166 MJ 和 8 $kgCO_2$-eq。若改以 1 g α-蒎烯为功能单位，水蒸气蒸馏反而成为较优方案，鲜样和干样对应能耗分别为 465、1 398 MJ，碳排放分别为 23、69 $kgCO_2$-eq。上述实例表明，当不同工艺所得提取物中目标成分含量差异较大时，仅用单位提取物碳足迹可能产生偏差，单位有效成分碳足迹更能反映工艺的真实环境效率。

3.2 浓缩过程协同评价

中药浓缩过程以溶剂去除和浸膏富集为主要目的，是提取液进入后续干燥、制粒或成型前的重要单元。与普通液体蒸发不同，中药提取液通常含有多糖、蛋白质、鞣质、皂苷、无机盐和多类指标成分，浓缩过程中固含量、黏度、密度、比热容和沸点升高等性质不断变化。随着浓缩接近终点，传热阻力增大，结垢、局部过热和成分降解风险增加，单位蒸发能耗可能升高。因此，浓缩单元评价不能只统计蒸汽或电力消耗，还应将物料状态、质量终点和设备运行负荷共同纳入评价。在核算过程中，需要确定具体的核算范围[51]，如表 4 所示。

不同浓缩技术的主要能源形式存在明显差异，单效和多效蒸发以蒸汽或热水为主，机械蒸汽再压缩（mechanical vapor recompression，MVR）以压缩机电耗为主，膜浓缩以泵的消耗为主，冷冻浓缩则以制冷系统电耗为主。不同能源应分别记录，再按照统一的热值或折标准煤系数进行折算。浓缩过程综合能耗如式（10）所示。

$$E_{conc}=\sum_{j=1}^{n} A D_j \times k_j \quad (10)$$

E_{conc}为浓缩过程综合能耗（kgce）；AD_j为第*j*类能源活动数据；k_j为对应的能源折算系数

指标同样可以参考现行标准的思路进行延伸，如式（11）、（12）所示。

$$SEC_{evap}=\frac{E_{conc}}{m_{evap}} \quad (11)$$

$$SEC_{qualified}=\frac{E_{conc}}{m_{qualified}} \quad (12)$$

SEC_{evap}为单位去除溶剂能耗（kgce/kg）；$SEC_{qualified}$为单位合格浓缩液能耗（kgce/kg）；m_{evap}为蒸发水量（kg）；$m_{qualified}$为达到质量要求的浓缩液质量（kg）

对比中药提取与中药浓缩过程，提取过程是“从零到有”而浓缩过程则为“从少至多”，面对二者相比之下的特殊情况，对浓缩过程可设立浓度变化的指标，如式（13）、（14）所示。

表 4 不同中药浓缩方法的活动数据与质量评价指标

Table 4 Activity data and quality evaluation indicators for different concentration methods of traditional Chinese medicines

浓缩类型	具体方式	活动数据	质量评价标准	对关键质量属性的影响
热驱动蒸发浓缩	常压蒸发、减压蒸发、单效蒸发、薄膜蒸发、刮板薄膜蒸发	进料量、出料量、蒸发溶剂量、蒸汽用量、热水或导热油用量、电耗、浓缩温度、真空度、浓缩时间、循环泵运行时间、冷却水循环电耗、清洗水量和清洗时间	相对密度、固含量、黏度、色差、多指标成分及挥发性成分总量保留率、指纹图谱相似度	热敏及挥发性成分易损失；黏度、密度升高，色泽加深，易浑浊或沉淀
蒸汽梯级与热泵浓缩	双效蒸发、三效蒸发、热力蒸汽再压缩、机械蒸汽再压缩、热泵低温浓缩	一效生蒸汽用量、驱动蒸汽用量、压缩机电耗、循环泵电耗、真空泵电耗、二次蒸汽回收量、蒸发水量、蒸发温度、效间压力、运行时间和清洗频次	相对密度、固含量、黏度、色差、多指标成分总量保留率、指纹图谱相似度、热降解标志物	低温短时条件下成分保留较好；物料黏度、密度升高，色泽变化较小
膜分离与膜热浓缩	超滤预处理、纳滤浓缩、反渗透浓缩、膜蒸馏浓缩、微滤-膜蒸馏集成浓缩	进料量、透过液量、浓缩液量、膜通量、跨膜压差、操作温度、高压泵电耗、循环泵电耗、清洗水量、清洗频次	相对密度、固含量、黏度、浊度、粒径、指标成分总量回收率、组分选择性、指纹图谱相似度	热敏成分保留较好，但小分子或挥发性成分可能损失；浊度降低，黏度、密度升高
低温相变与集成浓缩	冷冻浓缩、渐进冷冻浓缩、膜-蒸发集成浓缩	制冷压缩机电耗、冷冻温度、冰晶生成量、冰晶分离电耗、循环泵电耗、预浓缩倍数、后续蒸发负荷、清洗水量、冷媒补充或泄漏量	相对密度、固含量、黏度、色差、相稳定性；指标及挥发性成分总量保留率、冰相夹带率	热敏及挥发性成分较好；色泽、香气变化小，存在析晶、沉淀或分层现象

$$EC_{\Delta S}=\frac{E_{conc}}{w_t-w_0} \quad (13)$$

$$EC_{\Delta C_a}=\frac{E_{conc}}{C_{a.t}-C_{a.0}} \quad (14)$$

$EC_{\Delta S}$为单位固含率增量能耗（kgce/kg）；E_{conc}为浓缩总能耗（kgce/kg）；w_0和w_t分别为初始、终点固含率；$EC_{\Delta C_a}$为单位指标成分浓度提升能耗（kgce·L/kg)；E_{conc}为浓缩总能耗（kgce/kg）；$C_{a.0}$为初始指标成分浓度（kg/L）；$C_{a.t}$为终点指标成分浓度（kg/L）

Marie 等[52]以甘蔗汁浓缩为研究对象，将初始约 20 °Bx（20 度白利糖度）的甘蔗汁通过冷冻浓缩和蒸发浓缩逐步提高至制糖所需浓度。结果显示，当冷冻浓缩-蒸发浓缩的转折点设为 63 °Bx 时，总理论比能耗为 3 072.26 kJ/kg 粗糖；若在 40 °Bx 提前转入蒸发阶段，整体能耗比 63 °Bx 转折方案升高 65.04%。进一步看，20 °Bx 升至 40 °Bx 需要去除 50%的总溶液质量，相当于去除 62.5%的初始水分；而 40 °Bx 升至 60 °Bx 仅需去除 16.67%的总溶液质量，相当于 20.83%的初始水分。结果说明，浓缩过程中每提升相同浓度所对应的除水量和能耗并不相同，能耗评价应关注浓度提升过程，而不宜仅以最终产品质量归一化。除上述能耗计算方式之外，钟文蔚等[53]通过测定白利度、固含率、密度、比热容和导热率等动态物性参数，建立了中药水提液浓缩过程瞬时能耗计算思路，为浓缩能耗评价提供了过程化依据。

关于浓缩单元碳足迹测算方面，同样适用于排放因子法计算，如式（15）所示。

$$CF_{conc}=\sum_{i=1}^{n} AD_i \times EF_i \quad (15)$$

CF_{conc}为浓缩单元碳足迹（$kgCO_2$-eq）

针对不同的浓缩方式，碳足迹产生的侧重点也不同。单效与多效果浓缩的排放多来自于外购蒸汽或自备锅炉蒸汽，MVR 以及膜浓缩则多来自于电力的间接排放。冷冻浓缩则主要包括制冷系统产生的碳排放。

上述对于浓缩环节的相关计算过程可沿用提取过程的测算方式，在食品行业中也有相关运用。Kiyak 等[54]对杏泥浓缩物生产开展的生命周期评价，同样以排放因子法为计算基础并以 1 kg 浓缩杏泥为功能单位。研究结果显示，1 kg 杏泥浓缩物的全球变暖潜势（global warming potential，GWP）为 1.003 $kgCO_2$-eq，其中蒸发单元对 GWP 的贡献约为 30%，仅次于杏原料生产，说明蒸发浓缩是该产品碳足迹的重要热点。Notarnicola 等[55]以南意大利酒厂工业反渗透葡萄醪浓缩设备为对象，以生产 1 m^3 潜在酒精度由 10.5%提高至 11.5%的 Rosé Bombino 葡萄酒为功能单位，核算设备材料、浓缩用电、膜清洗及寿命终结等环节的环境影响。结果表明，运行阶段是系统环境负荷的主要来源，其中泵送电耗和膜清洗贡献较大。

此外，生态环境部发布的重点行业碳排放补充数据核算报告模板规定，蒸汽锅炉供热的排放因子采用锅炉排放量与锅炉供热量之比确定[56]。依据《工业锅炉产品碳足迹核算方法》，锅炉使用阶段排

放可由燃料直接燃烧、燃料生产供应和锅炉辅助系统用电排放构成[57]。则关于自备锅炉蒸汽的排放因子如式（16）所示。

$$EF_{s,b}=\frac{Q_b E_{ad}/1\,000+C_m EF_m+AD_{eu}EF_e}{m_s} \quad (16)$$

$EF_{s,b}$为自备锅炉蒸汽排放因子（tCO_2-eq/t）；Q_b为锅炉有效供热量（GJ）；E_{ad}为单位供热量直接排放强度（$kgCO_2$-eq/GJ）；C_m为燃料消耗量（t）；EF_m为燃料生产阶段排放因子（tCO_2-eq/t）；AD_{eu}为锅炉及辅助系统用电量（MWh）；EF_e为电力排放因子（tCO_2-eq/MWh）；m_s为同期有效蒸汽产量（t）

当适用的重点行业缺少相应实测数据时，可按其规定使用 0.11 tCO_2e/GJ。电网购入电力和自备电厂供电对应的排放因子采用生态环境部网站发布的全国电网平均排放因子。直供重点行业企业使用且未并入市政电网的非化石能源电量、企业自发自用的非化石能源电量以及纯余热余压发电电量排放因子为 0。

不同浓缩技术均存在适宜的运行区间，单一设备通常难以兼顾低能耗、高浓缩倍数和热敏性成分保护。因此，研究方向逐渐向集成浓缩技术靠拢。膜过程可在低浓度阶段预先去除部分水分，降低后续蒸发负荷，MVR 则用于完成中高浓度阶段的浓缩。Xie 等[58]分别建立了反渗透、MVR 及二者连接过程的机制模型，并以单位产水成本和系统运行成本最小为目标开展联合优化，优化后系统日运行成本降低约 22%。

集成浓缩技术的运用仍然存在许多问题。如膜污染是限制中药膜浓缩长期稳定运行的主要因素。Liu 等[59]指出中药水提液中的蛋白质、淀粉、果胶和鞣质等大分子物质是膜污染的重要来源；运行通量超过阈值后，膜污染阻力和跨膜压差快速升高，恒通量模式下的污染程度尤为明显。对于高倍浓缩阶段的能耗瓶颈同样需要关注。随着固含量和黏度升高，膜过程的渗透驱动力下降，蒸发过程的传热阻力和循环负荷增加，MVR 压缩机和循环泵可能偏离高效运行区间。

在线监测为集成浓缩的阶段切换和终点判定提供了实时依据。Jin 等[60]采用近红外光谱连续检测金银花浓缩液中的有机酸、密度和水分，并通过优化采样方式减弱气泡、杂质及料液流动的干扰，实现多指标同步监测和过程异常识别，使质量判断由终点检验前移至过程监控。在此基础上，Naşcu 等[61]将模型预测控制用于制药蒸发过程，根据过程状态动态调节操作参数。与常规控制相比，该方法在设定值变化和进料波动下表现出更好的浓度跟踪与抗扰能力。未来可加强在线检测模型与控制系统的协同，提升模型在不同批次与复杂工况下的稳定性，并通过工业化验证推动浓缩过程向连续化、自动化和智能化发展。

3.3 干燥过程协同评价

干燥是中药生产中能耗较高且质量敏感的单元过程。其能耗主要用于水分蒸发和空气循环，不同设备的能源结构存在差异。在评价的过程中，首要步骤是确定核算边界。边界以实际参与生产的耗能装备为基本对象。具体而言，可将药材进入干燥设备至达到规定含水率或质量要求并完成出料的过程核算边界。边界内应纳入主要的干燥设备及其辅助系统，相应能源输入包括电力、天然气、煤等物质[62]，见表 5。对于未实际参与该批次生产的备用设备、厂房照明和公共空调可根据研究目的作为公摊项或边界外项目单独说明。

在明确核算边界后，应进一步建立干燥单元的能源清单。干燥总能耗可按不同能源类型分别核算后统一折算，能耗的计算公式可以参考现行标准。干燥总能耗的计算公式如式（17）所示。

$$E_{drying}=\sum_{j=1}^{n} A\,D_j\times k_j \quad (17)$$

E_{drying}为干燥过程综合能耗（kgce）

在总能耗基础上，可进一步计算单位合格干燥品能耗、单位除水量能耗和单位能耗除湿量，如式（18）～（20）所示。

$$SEC_{product}=\frac{E_{total}}{M_{qualified}} \quad (18)$$

$$SEC_{water}=\frac{E_{total}}{M_{water}} \quad (19)$$

$$SMER=\frac{M_{water}}{E_{el}} \quad (20)$$

$SEC_{product}$为单位合格干燥品能耗（kgce/kg）；SEC_{water}为单位除水量能耗（kgce/kg）；$SMER$为单位电耗除湿量［kg/(kW·h)］；$M_{qualified}$为合格干燥品质量（kg）；M_{water}为脱除水分质量（kg）

对于以电力为主的热泵、微波、红外和微波真空干燥，$SMER$ 可作为评价除湿效率的重要指标。高萌等[63]开展了低温环境下回热型热泵热风干燥试验，设置了不同装载量和铺料厚度条件。当装载量为 910 kg、铺料厚度为 10 cm 时，干燥时间为

表 5 不同中药干燥方法的活动数据与质量评价指标

Table 5 Activity data and quality evaluation indicators for different drying methods of traditional Chinese medicines

干燥类型	典型工艺	主要活动数据	质量评价指标	对关键质量属性的影响
热风干燥	热风干燥、烘房干燥、带式干燥、隧道式干燥、流化床干燥	热源消耗量、风机电耗、干燥温度、风速、时间、进出料质量和水分	含水率、水分活度、色差、指标及挥发性成分保留率、收缩率、复水比、微生物限度	热敏性成分保留率较低；物料易收缩、硬化，色泽变化明显，复水性较差
热泵干燥	热泵干燥、热泵除湿干燥	压缩机电耗、风机电耗、辅助电加热电耗、干燥温湿度、时间、进出料质量和水分	含水率、水分活度、色差、热敏性成分保留率、收缩率、复水比、微生物限度	热敏性成分保留率较高；收缩和褐变较轻，色泽及复水性较好
真空干燥	真空干燥、耙式真空干燥、带式真空干燥、双锥回转真空干燥	蒸汽、热油或电加热消耗量、真空泵电耗、冷却水用量、真空度、温度、时间、进出料质量和水分	含水率、水分活度、指标成分保留率、溶解性、吸湿性、粒径、松密度、流动性	热敏性成分保留率高；物料结构较疏松、溶解性较好，但易吸湿，流动性一般
微波、红外及联合干燥	微波干燥、红外干燥、微波-真空、微波-热风、远红外-热泵联合干燥	微波或红外发生装置电耗、风机电耗、输送电耗、真空泵电耗、排湿冷凝能耗、功率、温度、时间、进出料质量和水分	含水率、水分活度及均匀性、指标成分保留率、色差、孔隙率、复水比、吸湿性、流动性	热敏性成分保留率较高；物料多孔、复水性较好，但功率过高易导致局部过热、开裂或硬化

106.5 h，耗电量为 476.8 kW·h，单位质量耗电量为（0.52±0.05）(kW·h)/kg，*SMER* 为 1.41 kg/(kW·h)；当装载量为 1 465 kg、铺料厚度为 20 cm 时，*SMER* 提高至 1.74 kg/(kW·h)。与非满载状态相比，满载状态下单位质量耗电量降低 26.9%，*SMER* 提高 23.4%，且物料表皮色泽金亮、干燥度较均匀。由此可见，干燥能耗评价需要将合格干燥品质量、脱除水分质量和干燥质量终点纳入分母约束，使能耗结果能够反映工艺效率和质量一致性。

干燥碳足迹评价可采用排放因子法。以单批次干燥过程或单位合格干燥品为功能单位，统计电力、蒸汽、天然气、煤、热油、冷却水和压缩空气等活动数据，再乘以对应排放因子，如式（21）所示。

$$CF_{\text{drying}}=\sum_{i=1}^{n} AD_i \times EF_i \quad (21)$$

CF_{drying}为干燥单元碳足迹（$kgCO_2$-eq）

为保证不同干燥方法之间具有可比性，碳足迹可以折算为单位合格干燥品碳足迹和单位除水量碳足迹，如式（22）、（23）所示。

$$CF_{\text{product}}=\frac{CF_{\text{drying}}}{M_{\text{qualified}}} \quad (22)$$

$$CF_{\text{water}}=\frac{CF_{\text{drying}}}{M_{\text{water}}} \quad (23)$$

CF_{product}为单位合格干燥品碳足迹（$kgCO_2$-eq/kg）；CF_{water}为单位除水量碳足迹（$kgCO_2$-eq/kg）

Kaveh 等[64]在实验中比较热风、微波、红外、真空及复合干燥时，将单位能耗定义为去除 1 kg 水所需能量，并进一步估算 CO_2、SO_2 和 NO_x 排放。这一处理方式说明，单位除水量碳足迹能够消除原料初始含水率和终点含水率差异带来的影响，适合用于不同干燥技术之间的横向比较，如在比较青豌豆不同干燥方式时发现，热风干燥每千克水排放 CO_2 29.7～225.8 kg，而微波干燥每千克水排放 CO_2 5.46～26.03 kg，微波干燥因体积加热和传质速率较高，表现出较低单位除水量排放。

3.4 关键单元多目标优化与协同决策

中药生产单元过程中的温度、时间、压力等会同时影响产品质量、能源消耗和碳排放。提高工艺强度可能促进物质转移或加快水分去除，也可能增加能源需求和成分损失。能耗与碳足迹也不完全同步，后者还受电力结构、蒸汽来源及燃料类型影响。单元过程协同评价不能停留在质量、能耗和碳足迹的独立核算层面，而应建立工艺参数与 3 类指标之间的量化关系，并在质量合格的前提下开展多目标优化。质量约束应先采用关键质量属性的原始量值表示。设工艺参数向量为 x，第 k 项关键质量属性为 $q_k(x)$，其允许范围如式（24）所示。

$$L_k \leqslant q_k(x) \leqslant U_k \quad (24)$$

L_k 和 U_k 分别为第 k 项关键质量属性允许的下限和上限，同时与 $q_k(x)$采用相同单位，指标成分含量可采用 mg/g、mg/mL；成分转移率、保留率及含水率采用%；密度采用 g/mL；指纹图谱相似度为无量纲数。《中国药典》限度、企业放行标准和安全性要求都属于硬约束，任一指标不合格该工艺条件即从可行域中剔除。

质量约束能够区分合格与不合格方案，但不能反映合格方案之间的综合质量差异。进入可行域后，需要对各项质量指标进行无量纲化。正向指标是指在允许范围内，数值增大代表质量表现改善，如成分保留率和指纹图谱相似度等；逆向指标是指数值减小代表表现改善，如成分损失率和杂质含量等[65]。二者可分别采用正向和反向极差标准化，使转换后的指标均处于 0～1，且数值越大代表表现越优。固含量、密度和含水率等目标区间型指标不宜简单按正向或逆向处理，可根据其偏离目标值的程度转换为满意度[66]。通过无量纲化消除单位和数量级差异，为后续赋权和综合计算建立统一尺度。在完成无量纲化后，需要进一步分配质量指标权重。不同指标对产品安全性、有效性和稳定性的贡献并不相同，直接等权处理会忽略其质量意义。具体分配方法[67]见表 6。

表 6　质量指标权重分配方法及适用范围

Table 6　Quality-indicator weighting methods and their scopes of application

赋权类型	方法	基本原理	适用范围
主观赋权	层次分析法	将评价目标划分为不同层级，通过指标两两比较构建判断矩阵，计算相对权重	指标层级明确，指标与安全性、有效性和稳定性的关系较清楚
主观赋权	模糊层次分析法	将专家对指标重要性的模糊判断转化为模糊数，再计算指标权重	指标体系复杂，专家难以给出精确的重要性比例
主观赋权	最优—最劣法	先确定最重要和最不重要的指标，再分别比较其他指标与二者的相对重要程度	指标数量较多，希望减少专家两两比较次数
客观赋权	熵权法	根据指标在不同方案间的离散程度计算信息熵，差异越明显，权重通常越高	试验样本较充分，指标波动能够反映工艺条件差异
客观赋权	变异系数法	以指标标准差与均值之比衡量相对变异程度，变异越大，所赋权重越高	指标量纲和变化幅度差异较大，需要比较相对离散程度
客观赋权	CRITIC 法	综合指标标准差和指标间相关系数计算信息量，兼顾指标差异性与冲突性	多种成分、指纹峰或物性指标之间存在明显相关性
客观降维与间接赋权	主成分分析法	将多个相关指标转换为少数相互独立的主成分，根据载荷和方差贡献率提取综合信息	指标数量较多且共线性明显，需要压缩冗余指标

面对中药生产单元的复杂过程，主客观组合赋权会具有更多优势。具体计算时，可先由专家判断得到主观权重，再根据试验数据计算客观权重。两类权重可采用乘积归一化方式合成，如式（25）所示。

$$w_k=\frac{w_k^{\mathrm{S}}w_k^{\mathrm{O}}}{\sum_{j=1}^{n}w_j^{\mathrm{S}}w_j^{\mathrm{O}}} \tag{25}$$

w_k^{S}和w_k^{O}分别为第 k 项指标的主观权重和客观权重；w_k 为组合权重，且全部权重之和为 1

Jiang 等[68]以神授太乙散水提工艺为研究对象，选取迷迭香酸、异欧前胡素、葛根素、浸膏得率和指纹图谱相似度作为综合评价指标。通过模糊层次分析法确定主观权重，再利用基于指标相关性的指标权重确定法（criteria importance through intercriteria correlation，CRITIC）计算客观权重，最终将两类权重相乘并归一化，得到各指标的组合权重。标准化指标与组合权重可形成综合质量指数，如式（26）所示。

$$Q_i=\sum_{k=1}^{n}w_k z_{ik} \tag{26}$$

Q_i为第 i 个工艺方案的综合质量指数；z_{ik}为标准化后的质量指标。Q_i越大说明综合质量表现越接近评价目标。该指数只用于比较已经满足质量约束的方案，不允许某项指标的高得分补偿另一项指标不合格。Jiang 等[65]在郁金散乙醇提取工艺优化中，将 13 种活性成分含量和干浸膏得率进行正向标准化，以消除各指标在单位和数量级上的差异。在此基础上，采用层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）根据处方配伍，“君、臣、佐、使”关系和成分药效贡献确定主观权重，利用 CRITIC 依据指标的离散程度和指标间冲突性计算客观权重。通过主客观权重乘积归一化得到组合权重，并与标准化指标加权求和形成综合提取质量得分。

综合质量指数建立后，需要进一步构建工艺参数与质量、能耗和碳足迹之间的响应模型。具体实施时可先进行实验设计获得不同工艺条件下的质

量、能耗和碳足迹数据，再分别建立模型，如式（27）～（29）所示。

$$Q(x)=f_Q(x) \quad (27)$$

$$SEC(x)=f_E(x) \quad (28)$$

$$PCF(x)=f_C(x) \quad (29)$$

$Q(x)$为综合质量指数；$SEC(x)$为单位能耗（kgce/kg）；$PCF(x)$为单位碳足迹（$kgCO_2$-eq/kg）

3 个模型需在同一生产批次中，并统一边界以及功能单位的情况下建立。李月婷等[69]以溶剂倍数、提取时间和提取次数为工艺因素，以 6 种指标成分含量及出膏率为评价指标，采用 AHP-CRITIC 组合赋权构建综合评分，并进一步建立以工艺参数为输入、综合评分为输出的反向传播（back propagation，BP）神经网络模型。结果表明，10 倍量溶剂、提取 2 h、提取 3 次的综合评分最高，但综合考虑提取效率、时间和成本后，最终选择 10 倍量溶剂、提取 1 h、提取 2 次的工艺，验证试验中各指标 RSD 均小于 3%。

模型建立后往往不能直接确定唯一的最佳工艺条件。综合质量指数、单位能耗和单位碳足迹的最优点通常不重合。在多数情况下，质量与能耗和碳足迹是相互制约的。可将综合质量指数转换为质量偏差（$D_Q=1-Q$），建立 3 目标模型，如式（30）所示。

$$\min_x \ F(x)=\left[D_Q(x),SEC(x),PCF(x)\right] \quad (30)$$

3 个目标相互冲突时，通常不存在 1 个方案能够使其同时达到各自最优。若某一方案在改善任一目标时，必然导致至少一个其他目标恶化，则该方案属于帕累托最优解[70]。全部非支配解构成帕累托最优解集，其在目标空间中的边界称为帕累托前沿。帕累托解集能够排除存在更优替代条件的低效方案，并保留质量、能耗和碳足迹之间的有效折中关系。目前存在的求解方法[71-72]见表 7。

表 7 帕累托最优解集求解方法及适用范围

Table 7 Solution methods and scopes of application for Pareto-optimal sets

方法	基本原理	适用范围
ε-约束法	保留 1 个目标作为主目标，将其余目标转化为带有 ε 参数的约束；通过逐步改变 ε 值，重复求解单目标模型，获得不同约束水平下的帕累托解	目标数量较少，且质量指标、生产能力或碳排放等具有明确上下限的问题
非支配排序遗传算法 II	采用快速非支配排序确定解的优先等级，通过精英保留避免优良解丢失，并利用拥挤距离维持帕累托解集的分布性和多样性	适用于 2～3 个相互冲突的目标，决策变量较多、模型非线性较强，可与响应面、神经网络等代理模型结合
基于分解的多目标进化算法	通过权重向量将多目标问题分解为一组相互关联的单目标子问题，各子问题利用邻域解的信息协同进化，逐步逼近完整帕累托前沿	适合目标数量较多、目标关系复杂或帕累托前沿形状不规则的问题
多目标粒子群优化	利用粒子的个体经验和群体经验更新搜索方向，由外部档案保存非支配解，并通过网格、拥挤度或变异策略维持解集多样性	决策变量主要为温度、压力、时间和流量等连续变量的问题，适合与响应面、神经网络或支持向量回归模型结合
多目标贝叶斯优化	利用高斯过程等概率代理模型预测目标值及不确定性，通过采集函数在“探索未知区域”和“利用潜在最优区域”之间进行平衡，迭代推荐下一组试验条件	适用于单次试验耗时长、原料及检测成本高、可获得样本数量有限的研究内容

通过利用帕累托解集将大量工艺参数组合压缩为一组非支配条件，进一步量化质量、能耗和碳足迹之间的交换关系。最后确定质量合格条件下能够达到的最低能耗和最低碳排放边界。如在化工行业中，Liu 等[73]基于大型装置的工业数据，在 Aspen Plus 流程模拟软件中建立并验证了分馏及吸收-稳定系统的稳态模型，以产物总收率最大化、分离系统能耗最小化为目标，并将其关键组分含量作为质量约束。通过 MATLAB 数值计算软件调用 Aspen Plus 计算不同操作参数下的目标值，再利用非支配排序遗传算法 II 的非支配排序、拥挤距离和遗传迭代获得产率-能耗帕累托解集，从中确定代表性操作工况。

4 面向碳中和的中药制造节能降碳路径

4.1 基于热点诊断的装备与工艺强化

装备与工艺强化是中药生产节能降碳的重要技术路径，其内涵并非局限于单一单元操作的局部

改进，而是在传热传质方式、能量回收利用和工序组织形式上实现整体优化。基于能耗与碳排放热点识别结果，可优先对热量输入集中、物料停留时间长、溶剂消耗量大的单元进行改进。现有研究表明，传热传质强化可直接压缩过程时间并减少物料与能源消耗，龚乃超等[74]采用超声联合减压内部沸腾法提取吴茱萸生物碱，提取时间较传统方法缩短约 1/2，乙醇用量减少约 80%。在热能利用方面，机械蒸汽再压缩和热泵技术通过二次蒸汽或废热回收显著降低外供能源需求，侯超等[75]将机械蒸汽再压缩用于中药提取液浓缩，较单效、双效和三效蒸发运行费用分别降低 77.3%～78.8%、67.2%～68.9% 和 38.5%～41.7%。在能量输入方式优化方面，Xu 等[76]采用红外-热风联合干燥和顺序式联合干燥处理菊花饼，红外-热风联合干燥由 300 min 降至 210 min，说明辐射与对流耦合能够强化水分迁移并缩短干燥历程，降低整体工序能耗。此外，工序集成与密闭化制造减少了中间转运、重复处理和溶剂使用，也是装备强化向制造系统延伸的重要表现。Teng 等[77]建立流化床制粒-干燥一体化工艺，以水替代 85%乙醇作为黏合剂，在同一密闭设备内完成制粒与干燥，颗粒产率和原料利用率均高于 90%，含水率低于 4%，并减少了转运步骤和粉尘污染。

4.2 过程运行优化与智能控制

过程运行优化则强调在既有设备与工艺路线条件下，通过关键参数优化、终点控制及运行调节减少无效消耗。对于中药生产过程的运行优化核心在于协调质量、效率与能耗之间的关系，避免因为生产工序的过度操作引起能源浪费。Li 等[78]提出基于人工智能的制药机器人平台，采用近红外高光谱成像（near-infrared hyperspectral imaging，NIR-HSI）监测原料活性成分，NIR 光谱实时追踪提取组分转移，分布式温度传感监测温度场分布，机器视觉结合神经网络模型识别沸腾状态；构建数字孪生模型整合多模态数据，预测温度场和沸腾状态；基于深度强化学习实现加热阶段自适应阀门控制和沸腾阶段端点预测。实验结果表明，该平台实现活性成分转移动态推断、温度变化监测及沸腾状态识别，在保证产品质量稳定性的同时降低能耗 7.54%～15.08%。王志强等[79]利用数字建模技术对真空带式干燥过程进行模拟，以加热温度、时间步长和物料层厚度为自变量，结合企业外购电力和热力的排放因子建立碳排放核算模型，将支出收入比作为优化目标以粒子群算法搜索最佳工艺参数组合，实现能耗和碳足迹协同优化。

4.3 公用工程协同与系统低碳化

系统协同与智能管控进一步将节能边界由单台设备拓展至车间和工厂层面，强调通过公用工程协同、在线监测与自动控制提升整体能源利用效率。Li 等[80]采用小试工艺验证、车间工艺设计和自动化控制系统设计相结合的方法，以三七总皂苷提取车间为对象，按生产要求设计车间，通过在线配液、自动投料、终点判定及公用工程实时监测与变频联动，将智能管控运用于车间层面，避免过量加热、公用工程空转和无效运行，实现过程控制与节能减排。王芬等[81]阐明基于设备集成的中药制造系统运行模式的实现可以提高中药制剂生产过程的效率以及企业的经济效益，如北京同仁堂股份有限公司已安装了全封闭、自动化中药粉碎、混合、计量分装系统，经过 3 年的研发和生产实践，实现了人员节约 40%以上、场地节约 30%以上、能耗节约 20%以上。说明流程级协同和在线监控不仅改善了质量，也已经在实际中体现出降耗效果。

能源结构优化可进一步降低中药生产的碳排放，但其效果受到电力来源、锅炉燃料和能源价格的影响。Högnabba 等[82]研究发现，工业高温热泵只有在电力碳排放较低的地区才能表现出明显的减排优势，其运行成本也随当地电价变化。Dai 等[83]比较了热泵与燃煤、燃气和电加热锅炉，在计算设备投资、燃料费用和后期运行成本后，优化热泵系统的总成本最低，较燃煤锅炉的投资回收期不足 7 年。因此，中药企业采用热泵、MVR 和余热回收技术时，既要比较节能减排效果，也要考虑设备投入、维护费用和能源费用的节约。碳价可增加节能改造的经济收益，但 Lou 等[84]发现碳价较低时这种收益有限，只有随着碳价提高，投资回收期才会明显缩短。现阶段制药行业尚未直接纳入全国碳排放权交易市场，因此，相关减排量更适合作为潜在经济价值进行评价，不能直接计为企业的实际交易收益。中药生产节能技术与优化策略见图 3。

4.4 从碳足迹核算到碳中和管理

节能减排路径能否真正形成减排效果，仍需依赖碳足迹核算进行量化验证。碳足迹核算除了作为结果统计工具，也应当转化为企业低碳管理依据，用于识别排放热点、比较技术方案、优化能源结构和支撑碳中和决策。



图 3　中药生产节能技术与优化策略

Fig. 3　Energy-saving technologies and optimization strategies for traditional Chinese medicine production

4.4.1　核算结果驱动的低碳决策　碳足迹核算可将中药制造过程中的能源消耗、物料投入和废弃物处置转化为统一的碳排放结果。通过贡献分析可判断提取、浓缩、干燥、公用工程、包装材料和药渣处置等环节的排放占比，明确优先改造对象。通过不同情景核算，可比较传统工艺、强化工艺、能源替代和资源化方案的减排效果。由此，碳足迹核算从“算清排放”进一步转向“指导选择”，为企业确定节能改造顺序、工艺优化方向和低碳产品评价提供依据。

药渣资源化可作为核算结果向管理措施转化的典型场景。药渣不宜简单视为废弃物或燃料，而应根据含水率、有机质、纤维素和安全风险进行分类利用。适宜高值化利用的药渣可用于发酵饲料、有机肥、栽培基质或种养殖循环；难以高值化利用的部分，可进一步用于生物质能源、生物炭或热解气化。不同利用路径的减排效果应通过碳足迹情景比较加以判断，避免将资源化利用简单等同于减排。

4.4.2　碳中和导向的系统管理　碳中和管理需要将碳足迹结果从厂内工序延伸至能源布局和供应链决策。对于热负荷较大的中药产品，建厂或扩产时需要关注蒸汽和电力价格，综合考虑蒸汽来源、区域电力碳因子、绿电供给等各方面现实条件。对于纯电设备，低碳性还需要结合当地电力结构和运行时段进行判断。因此，厂址选择、能源采购和设备配置应由成本导向进一步转向成本与碳强度协同导向。

在管理层面，中药企业可进一步建立批次级碳足迹台账，将智能电表、蒸汽流量计、批生产记录和质量检测结果纳入统一数据系统，实现从年度核算向过程管理转变。对于难以消除的残余排放，可在实际减排基础上通过绿电、碳信用或碳移除方式进行补偿。通过先核算、再减排、后抵消，避免以碳抵消替代工艺改造和能源优化。

5　结语

在“双碳”目标和中药制造绿色转型背景下，中药生产低碳评价需要逐渐转向能耗、碳排放与质量属性的协同分析。中药生产过程链条较长，提取、浓缩和干燥等单元既是物质转移和形态转化的关键环节，也是蒸汽、电力和公用工程消耗较为集中的环节。现有研究已形成以排放因子法、生命周期评价和单位能耗指标为基础的评价思路，但中药产品具有成分复杂、质量终点多样和批次波动明显等特点，低碳评价不能脱离质量约束单独开展。基于此，能耗评价应从总量核算进一步落实到单位综合能耗、单位合格产出能耗和单位有效成分能耗等指标；碳足迹评价也应由总碳排放延伸至单位合格产品碳足迹、单位有效成分碳足迹和单位除水量碳足迹等指标。通过将能源输入、碳排放结果与成分转移、固含量提升、浓缩终点和水分脱除过程相联系，可以更准确地识别中药生产中的高耗能环节和高排放来源，也能为设备改造、工艺优化和过程控制提供更具针对性的评价依据。

当前中药生产能耗-碳足迹协同评价仍面临边界口径不一致、功能单位设置不清、企业实测数据不足和质量指标融入不充分等问题。其中，过程数据的精细化采集与边界匹配仍是制约评价结果可比性的重要因素。现有数据多停留在车间或设备层

面尚难与具体批次、工序产出和质量终点准确对应，导致单位综合能耗和单位碳足迹容易受到生产负荷、设备共用及辅助系统分摊方式的影响。未来研究可在现有核算框架基础上进一步加强过程数据采集，建立质量参数、能耗数据和碳排放结果之间的动态关联。在线检测、PAT、数字孪生和智能控制等技术可用于提高数据采集频率和过程解释能力，生产设备和公用工程协同优化等技术则应在质量一致性前提下评价其节能降碳效果。随着过程数据库、评价指标和智能化控制手段不断完善，中药生产低碳评价有望由静态核算走向动态诊断，并进一步服务于车间优化、企业碳管理和中药制造绿色转型。

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, 市场监管总局, 生态环境部. 关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案（2024—2025 年）的通知: 发改环资〔2024〕1046 号 [EB/OL]. (2024-07-14) [2026-06-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6967197.htm.

[2] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 国家市场监督管理总局, 等. 关于印发《产品碳足迹核算标准编制工作指引》的通知: 环气候〔2024〕91 号 [EB/OL]. (2024-12-28) [2026-0611]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202501/t20250106_1099994.html.

[3] 工业和信息化部, 国家民委, 农业农村部, 等. 工业和信息化部等八部门关于印发《中药工业高质量发展实施方案（2026—2030 年）》的通知: 工信部联消费〔2026〕33 号 [EB/OL]. (2026-01-30) [2026-06-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202602/content_7057174.htm.

[4] 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.

[5] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, *et al*. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [M]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006: 1.4-1.6.

[6] 邓双炳, 吕翔, 王章伟, 等. 减排、集采等新形势下关于中药提取研究的思考 [J]. 南京中医药大学学报, 2022, 38(5): 445-451.

[7] 褶耀明, 罗中良. 基于 MVR 技术的中药浓缩工艺设计及应用 [J]. 内蒙古科技与经济, 2020(13): 85-86.

[8] 朱文学, 赵雅婷, 吴建章, 等. 根茎类中药材干燥技术与装备研究进展 [J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(1): 153-171.

[9] 岳建强, 王卫良, 王小易, 等. 中药渣的循环流化床环保处理 [J]. 中国粉体技术, 2020, 26(4): 59-64.

[10] 冉雨润, 李金娟, 何振, 等. 贵州省典型中药制药企业 VOCs 排放特征与健康风险评估 [J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2020, 37(3): 105-110.

[11] 孟晗, 刘俊杰, 王荣, 等. 基于 HACCP 风险评估的制药洁净空调系统设计思路探讨 [J]. 暖通空调, 2024, 54(6): 21-28.

[12] 邹志强, 付鹏亮, 梅逢, 等. 制药行业空压机自控系统节能优化策略分析 [J]. 机械工业应用, 2025(10): 119-122.

[13] 焦利元, 张会, 韩雪, 等. 中药渣资源化处理路径的环境和经济效益评估 [J/OL]. 中国生态农业学报 (中英文), https://link.cnki.net/urlid/13.1432.S.20260402.1114.002.

[14] 杨鹤年, 张津铖, 吴宿慧, 等. 中药配方颗粒制备工艺、质量评价、与传统汤剂一致性的研究现状分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(8): 266-274.

[15] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 中草药干燥加工现状及发展趋势 [J]. 南京中医药大学学报, 2021, 37(5): 786-796.

[16] 王永香, 郭立玮, 钟文蔚, 等. 基于“中药溶液环境”学说剖析若干中药制药浓缩过程难题 [J]. 中草药, 2023, 54(23): 7907-7917.

[17] 徐冰, 史新元, 罗赣, 等. 中药工业大数据关键技术与应用 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2): 221-232.

[18] Kanchiralla F M, Jalo N, Thollander P, *et al*. Energy use categorization with performance indicators for the food industry and a conceptual energy planning framework [J]. *Appl Energy*, 2021, 304(C): 117788.

[19] 综合能耗计算通则: GB/T 2589—2020 [S]. 2020: 1-4.

[20] Ma S Y, Huang Y M, Cai W, *et al*. Integrated sustainable benchmark based on edge-cloud cooperation and big data analytics for energy-intensive manufacturing industries [J]. *J Manuf Syst*, 2024, 74: 1037-1056.

[21] 工业企业温室气体排放核算和报告通则: GB/T 32150—2025 [S]. 2025: 1, 4-5.

[22] 单位产品能源消耗限额编制通则: GB/T 12723—2024 [S]. 2024: 1.

[23] 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.

[24] 陈玉芙, 陈健. 光明乳业 ESG 信息披露案例研究 [J]. 中国林业经济, 2024(4): 67-74.

[25] Bouchier F, Boje A, Reynolds G. Life cycle assessment of pharmaceutical tablet manufacturing: A comparative analysis and systems model integration framework [J]. *Int J Pharm X*, 2025, 10: 100395.

[26] 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.

[27] Hagenaars R H, Heijungs R, de Koning A, *et al*. The greenhouse gas emissions of pharmaceutical consumption and production: An input-output analysis over time and

across global supply chains [J]. *Lancet Planet Health*, 2025, 9(3): e196-e206.

[28] Meng X Y, Wen Z G, Qian Y, *et al*. Evaluation of cleaner production technology integration for the Chinese herbal medicine industry using carbon flow analysis [J]. *J Clean Prod*, 2017, 163: 49-57.

[29] 于玉洁, 杨瑞, 张顺心, 等. 制药企业 VOCs 无组织排放监控技术进展 [J]. 煤炭与化工, 2023, 46(7): 156-160.

[30] 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): 120-127.

[31] 慈志敏, 马鸿雁, 李正, 等. 中药绿色制造碳足迹核算的关键问题与对策 [J]. 中草药, 2026, 57(3): 789-798.

[32] 温室气体产品碳足迹量化要求和指南: GB/T 24067—2024 [S]. 2024: 17-18.

[33] Guyomarc'h F, Héquet F, Le Féon S, *et al*. Life cycle assessment to quantify the environmental performance of multi-products food processing systems such as milk fractionation: Importance of subdivision and allocation [J]. *J Food Eng*, 2024, 380: 112147.

[34] Li W Y, Li Q Y, Guo L W, *et al*. Traditional Chinese medicine extract properties incorporated energy analysis for membrane concentration processes [J]. *Membranes*, 2021, 11(9): 673.

[35] 郭立玮, 王永香, 钟文蔚, 等. 基于膜一体化技术的中药制药流程再造 [J]. 过程工程学报, 2023, 23(3): 411-420.

[36] Kaveh M, Çetin N, Gilandeh Y A, *et al*. Comparative evaluation of greenhouse gas emissions and specific energy consumption of different drying techniques in pear slices [J]. *Eur Food Res Technol*, 2023, 2(12): 3027-3041.

[37] 李正, 康立源, 范骁辉. 中药制药过程数据集成、数据挖掘与可视化技术研究 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(15): 2989-2992.

[38] 李越, 熊皓舒, 鞠伟, 等. 中药智能制造实时数据库开发、计算机化系统验证及应用 [J]. 中国医药工业杂志, 2021, 52(10): 1396-1407.

[39] 杨作明, 张治东, 李娟, 等. 基于物联网的能耗在线监测平台研究与应用 [J]. 工业安全与环保, 2019, 45(10): 103-106.

[40] Chen Z Y, Lian J Z, Zhu H Y, *et al*. Application of life cycle assessment in the pharmaceutical industry: A critical review [J]. *J Clean Prod*, 2024, 459: 142550.

[41] 和君强, 熊孜, 邓林, 等. 基于生命周期评价的杨梅鲜果碳足迹研究 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2025, 33(3): 413-423.

[42] Ansar M A, van Zelm R, Ragas A M J. Closing data gaps for LCA of pharmaceutical production: Estimating energy usage by upscaling laboratory data [J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2025, 13(47): 20363-20376.

[43] 陈莎, 李燚佩, 曹磊, 等. 产品碳足迹评价中不确定度与敏感度相结合的数据质量分析 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 1067-1072.

[44] Mondal S, Das M, Debnath S, *et al*. An overview of extraction, isolation and characterization techniques of phytocompounds from medicinal plants [J]. *Nat Prod Res*, 2026, 40(7): 1939-1961.

[45] 刘玉峰, 王佳玉, 李若凡, 等. 半仿生联合提取技术在中药提取中的应用进展 [J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2025, 52(2): 152-158.

[46] 中成药单位产品能源消耗限额: DB11/T 2260—2024 [S]. 2024: 1-2.

[47] Kobus Z, Krzywicka M, Pecyna A, *et al*. Process efficiency and energy consumption during the ultrasound-assisted extraction of bioactive substances from hawthorn berries [J]. *Energies*, 2021, 14(22): 7638.

[48] Chen Y X, Gavahian M. Taguchi-based optimization of ultrasound-assisted valorization of coffee silver skin for increasing phenolic content: Antioxidant activity, physical properties, and energy consumption assessment [J]. *Processes*, 2025, 13(12): 3957.

[49] Seling G S, Rivero R C, Sisi C V, *et al*. Integrated approach for the optimization of the sustainable extraction of polyphenols from a south American abundant edible plant: *Neltuma ruscifolia* [J]. *Foods*, 2025, 14(17): 2927.

[50] Moura B, Monteiro H, Mata T M, *et al*. Life cycle energy and carbon emissions of essential oil extraction from Rosemary [J]. *Energy Rep*, 2022, 8: 291-297.

[51] 杨凯, 杨怡琴, 徐翱昌, 等. 中药现代化浓缩新技术与装备: 现状、挑战及发展趋势 [J]. 中国中药杂志, 2026, 51(11): 3143-3151.

[52] Marie L F, Sunkara P R, Sai P V, *et al*. Solar thermal heating and freeze concentration for non-centrifugal sugar production: Design and performance analysis [J]. *Energy Engineer*, 2020, 117(5): 323-342.

[53] 钟文蔚, 黎万钰, 丁菲, 等. 基于中药水提液浓缩过程溶液环境特征参数相关性的瞬时能耗计算方法探索: 以玉屏风散水提液为例 [J]. 中草药, 2021, 52(7): 1937-1944.

[54] Kiyak B, Colak Gunes N. Life cycle assessment of apricot puree concentrate production [J]. *J Food Eng*, 2024, 368: 111919.

[55] Notarnicola B, Tassielli G, Renzulli P A. Environmental and technical improvement of a grape must concentration system via a life cycle approach [J]. *J Clean Prod*, 2015, 89: 87-98.

[56] 生态环境部办公厅. 关于做好 2023—2025 年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知 [EB/OL]. (2023-10-18) [2026-06-11]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html, 2023.

[57] 工业锅炉产品碳足迹核算方法: T/CASEI 025—2023, T/CBWA 0023—2023 [S]. 2023: 5-8.

[58] Xie F L, Zhao Y, Jiang A P, *et al*. Joint modeling and operational optimization of a reverse osmosis–mechanical

vapor recompression system for coal-fired power plant wastewater [J]. *Membranes*, 2024, 14(3): 65.

[59] Liu H B, Tao X B, Zhu H X, *et al*. Effect of operation mode on membrane fouling from traditional Chinese medicine water extracts [J]. *J Water Process Eng*, 2022, 48: 102943.

[60] Jin Y, Du W J, Liu X S, *et al*. Application of near infrared spectroscopy and real time release testing combined with statistical process control charts for on-line quality control of industrial concentrating process of traditional Chinese medicine "Jinyinhua" [J]. *Infrared Phys Technol*, 2022, 123: 104135.

[61] Nașcu I, Diangelakis N A, Muñoz S G, *et al*. Advanced model predictive control strategies for evaporation processes in the pharmaceutical industries [J]. *Comput Chem Eng*, 2023, 173: 108212.

[62] 王乐意, 李长河, 刘明政, 等. 中药材干燥技术与装备研究现状 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 1-28.

[63] 高萌, 李明, 王云峰, 等. 低温环境下热泵热风干燥藏药性能试验 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 316-322.

[64] Kaveh M, Abbaspour-Gilandeh Y, Nadimi M, *et al*. Review of advanced drying techniques: A path to lower greenhouse gas emissions in agriculture [J]. *Discov Sustain*, 2025, 6(1): 423.

[65] Jiang L D, Zhang W D, Zhao W B, *et al*. Optimization of ethanol extraction technology for Yujin Powder using response surface methodology with a box-behnken design based on analytic hierarchy process-criteria importance through intercriteria correlation weight analysis and its safety evaluation [J]. *Molecules*, 2023, 28(24): 8124.

[66] Leyva-Jiménez F J, Fernández-Ochoa Á, de la Luz Cádiz-Gurrea M, *et al*. Application of response surface methodologies to optimize high-added value products developments: Cosmetic formulations as an example [J]. *Antioxidants*, 2022, 11(8): 1552.

[67] Wolny M. Comparison of key weighting methods in multi-criteria decision analysis [J]. *Organizat Manag Series*, 2025(223): 649-666.

[68] Jiang M C, Qiu Z D, Diao Y Y, *et al*. Optimization of the extraction process for Shenshou Taiyi powder based on Box-Behnken experimental design, standard relation, and FAHP-CRITIC methods [J]. *BMC Complement Med Ther*, 2024, 24(1): 251.

[69] 李月婷, 魏祖英, 王腾腾, 等. AHP-CRITIC 结合 BP-ANN 的归志方提取工艺优化研究 [J]. 分析测试学报, 2025, 44(11): 2256-2264.

[70] Cerda-Flores S C, Rojas-Punzo A A, Nápoles-Rivera F. Applications of multi-objective optimization to industrial processes: A literature review [J]. *Processes*, 2022, 10(1): 133.

[71] Morales-Hernández A, Van Nieuwenhuyse I, Rojas Gonzalez S. A survey on multi-objective hyperparameter optimization algorithms for machine learning [J]. *Artif Intell Rev*, 2023, 56(8): 8043-8093.

[72] Wang X L, Jin Y C, Schmitt S, *et al*. Recent advances in Bayesian optimization [J]. *ACM Comput Surv*, 2023, 55(13s): 1-36.

[73] Liu Y J, Chu M H, Ye Q, *et al*. Multi-objective optimization of FCC separation system based on NSGA-II [J]. *Chem Eng Sci*, 2025, 302: 120829.

[74] 龚乃超, 锁进猛, 李梦婷, 等. 吴茱萸生物碱多指标优化提取新方法的探索 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(12): 125-130.

[75] 侯超, 张振涛, 杨鲁伟, 等. 中药提取液蒸发浓缩过程采用机械蒸汽再压缩技术特性研究 [J]. 现代化工, 2016, 36(11): 172-174.

[76] Xu H H, Wu M, Wang Y, *et al*. Effect of combined infrared and hot air drying strategies on the quality of *Chrysanthemum* (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) cakes: Drying behavior, aroma profiles and phenolic compounds [J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2240.

[77] Teng K X, Fu H, Wu G L, *et al*. QbD-guided traditional Chinese medicine manufacturing process: Development and optimization of fluid-bed granulation and drying processes for Xiaochaihu Capsules [J]. *AAPS PharmSciTech*, 2023, 24(7): 210.

[78] Li Z, Xue Q L, Yu Y, *et al*. How to build new productive forces for traditional Chinese medicine industry: Industrial perception intelligence and AI-based pharmaceutical robot [J]. *Engineering*, 2025, 52: 244-255.

[79] 王志强, 薛启隆, 刘新龙, 等. 基于数值模拟的中药制药减碳绿色优化策略 [J]. 上海中医药杂志, 2025, 59(9): 1-8.

[80] Li M S, Tan D M, Zhang Q. Design of traditional Chinese medicine extraction workshop process and automation system [J]. *Pharmacol Pharm*, 2023, 14(10): 407-427.

[81] 王芬, 徐冰, 刘雨, 等. 中药质量源于设计方法和应用: 连续制造 [J]. 世界中医药, 2018, 13(3): 566-573.

[82] Högnabba K, Tveit T M, Vittor S, *et al*. Economic and environmental considerations for the deployment of industrial very high temperature heat pumps in European markets [J]. *Energy*, 2024, 309: 133147.

[83] Dai B M, Liu C, Liu S C, *et al*. Life cycle techno-enviro-economic assessment of dual-temperature evaporation transcritical CO_2 high-temperature heat pump systems for industrial waste heat recovery [J]. *Appl Therm Eng*, 2023, 219: 119570.

[84] Lou Y L, Yang Y Z, Ye Y Y, *et al*. The economic impacts of carbon emission trading scheme on building retrofits: A case study with U.S. medium office buildings [J]. *Build Environ*, 2022, 221: 109311.

[责任编辑 潘明佳]