

中药制药干燥工艺碳足迹核算与多维“绿度”评价体系的构建

贾昌昊^{1#}, 粘雨志^{1#}, 刘嘉诚¹, 朱贝贝^{1,2,3}, 李文龙^{1,2,3*}

(1. 天津中医药大学 中药制药工程学院, 天津 301617; 2. 现代中医药海河实验室, 天津 301617; 3. 天津市中药智能制药与绿色制药重点实验室, 天津 301617)

摘要: 中药制药产业作为典型的高能耗产业, 其核心议题已经转化成更加绿色更加低碳并且可持续发展的行业需求, 尤其是在大力推动“双碳战略”的国际背景下。该文聚焦于产业高能耗操作中极具代表性的一环: 干燥, 一方面整理了国际通用的碳足迹核算标准, 考虑到中药具有原料复杂性与工艺特殊性, 进一步明确了碳足迹核算的边界、关键的排放源与适用的核算方法; 另一方面, 文章不局限于简单的碳足迹, 又创新性地引入并拓展了“绿度”的概念, 搭建了一个综合考量质量、能效、资源、环境的多维评价体系, 旨在系统探讨碳足迹核算规则与“绿度”评价在该领域的适用性。最后, 对典型干燥技术的潜在优势、主要短板及优化方向进行了指标映射, 明确了当前中药制药行业绿色化转型的核心需求, 并探讨了底层装备迭代与数字技术在未来应用的潜力。

关键词: 中药制药; 碳足迹; 生命周期评价; 绿度评价; 干燥工艺; 绿色制造; 可持续发展

中图分类号: O613.7; R283 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)10-0001-10

Construction of a Carbon Footprint Accounting and Multidimensional “Greenness” Evaluation System for Drying Processes in Traditional Chinese Medicine Manufacturing

JIA Chang-hao^{1#}, NIAN Yu-zhi^{1#}, LIU Jia-cheng¹, ZHU Bei-bei^{1,2,3}, LI Wen-long^{1,2,3*}

(1. College of Pharmaceutical Engineering of Traditional Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China; 2. Haihe Laboratory of Modern Chinese Medicine, Tianjin 301617, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Intelligent and Green Pharmaceuticals for Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China)

Abstract: Driven by the global push for a “dual carbon” strategy, the green, low-carbon, and sustainable transformation of the traditional Chinese medicine (TCM) pharmaceutical industry—a typically energy-intensive sector—has emerged as a core issue for its future development. This article focuses on a representative part of the high-energy-consumption operation in the industry: drying. On the one hand, the article sorted out the internationally accepted carbon footprint accounting standards and further clarifies the boundaries, key emission sources, and applicable carbon footprint accounting methods by considering the complexity of the raw materials and process particularity in TCM. On the other hand, the article is not limited to a simple carbon footprint; rather, it innovatively introduces and expands the concept of “greenness” and builds a multidimensional evaluation system that comprehensively considers quality, energy efficiency, resources, and the environment for systematically exploring the applicability of carbon footprint accounting rules and “greenness” evaluation in this field. Finally, the article maps the potential advantages, major limitations, and optimization directions of typical drying technologies using the proposed indicators; clarifies the core needs for the current green transformation of the TCM pharmaceutical industry; and discusses the potential of the underlying equipment iteration and digital technology in the future.

收稿日期: 2026-06-03; 修回日期: 2026-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3504502)

* 通讯作者: 李文龙, 博士, 研究员, 研究方向: 中药质量控制技术研究, E-mail: wshlwl@tjutcm.edu.cn

共同第一作者

Key words: traditional Chinese medicine pharmaceuticals; carbon footprint; lifecycle assessment; greenness evaluation; drying process; green manufacturing; sustainable development

随着“2030年碳达峰、2060年碳中和”等国家战略的推出,高能耗产业的绿色转型逐渐成为实现产业可持续发展的必然要求。随着中药制备技术和产业规模不断发展,现代化生产过程中的高能耗、资源消耗和环境负荷问题日益突出,并逐渐成为制约产业可持续发展的重要因素。目前,在化工及化学制药技术领域,基于生命周期评价的碳足迹核算以及绿色工艺评价已达到相对成熟的标准与实践^[1]。而中药制药因其原料的生物多样性、成分的复杂性以及炮制、提取、浓缩、干燥等工艺的特殊性,直接使用现有的碳足迹核算以及绿色工艺评价通用标准具有显著的局限性,最终导致中药制药领域碳核算基线模糊及绿色评价体系缺失等问题。这一标准的空缺不仅会阻碍中药企业精准量化自身环境、参与碳交易市场等方面的发展,也会间接制约中药企业绿色工艺技术的研发与优选。为解决这一现状,有必要结合中药制药具体单元操作的物料与能源特征,探索具有针对性的碳足迹核算与绿色评价方法。本文选择干燥这一典型高能耗单元作为研究对象,重点讨论其碳足迹核算边界、主要排放源及多维“绿度”评价方法。

生命周期评价(LCA)是国际公认的碳足迹核算核心方法论。例如,通过研究桑叶提取物的生命周期碳足迹发现,在该过程中碳的排放量较多,其中乙醇溶剂消耗的贡献超过四分之一,体现出工艺过程中能耗与物料隐含碳的重要性^[2]。因此,构建中药制药工艺碳足迹核算框架时,应系统识别直接排放、间接排放和投入物料的隐含碳排放。但当前所面临的主要问题是缺乏针对中药工艺本地化、精细化碳排放的基础数据,这为精确核算碳足迹带来了很大的困难^[3]。

碳足迹可以直观反映工艺产生的温室气体排放,却不足以概括中药制药工艺的整体绿色水平。绿色化学12项原则及相关绿色工艺研究,为从多个维度开展评价提供了理论依据^[4-5]。本文所引出的“绿度”,是指在明确系统边界和功能单位后,结合产品质量、能源利用效率、资源投入与循环利用、环境影响和安全风险等因素,对中药制药工艺绿色水平进行综合表征。因此,评价中药干燥工艺时,不能只看碳排放。热敏成分能否得到有效保留、粉体收率是否稳定、辅料消耗是否合理、溶剂能否回收,以及设备运行是否安全,都会影响工艺的实际绿色水平。

以中药生产流水线中能耗占比极大的干燥工艺为例,其面临着严峻的环保升级压力。研究表明,干燥过程是中药、食品等行业碳足迹的重要贡献环节^[6]。当前传统的中药干燥模式普遍存在显著的“非绿色”弊端:一方面,系统热效率低下,大量显热与潜热随尾气直接排放,造成极大的能源浪费;另一方面,工艺过程过度依赖化石燃料或高碳排电网,且为克服浸膏粘壁常需引入额外的高碳基辅料,进一步加剧了环境与资源负担。不同干燥技术的传热传质机制存在差异,其核心耗能单元、产品质量影响和资源消耗特征也有所不同,具体见表1。已有研究表明,清洁能源利用和组合干燥等技术具有降低干燥能耗与碳足迹的潜力^[7-8]。但其实际效果仍受物料性质、设备规模和运行参数等因素影响。基于此,本文以中药干燥工艺为例,构建碳足迹核算框架和多维“绿度”评价体系,并从产品质量、能源效率、资源利用以及环境与安全等方面分析典型干燥技术的特征。提取与浓缩作为干燥上游工艺,仅用于说明中药生产流程及干燥进料的来源,不作为本文独立的碳足迹和“绿度”评价对象。

1 中药制药干燥工艺碳足迹核算规则框架构建

1.1 核算标准与方法论基础

确立中药制药工艺的碳足迹核算体系,前提是必须锚定以生命周期评价为方法论的PAS 2050与ISO 14067等国际通用标准,这类方法为温室气体排放的系统量化提供了统一标尺^[1]。将其跨界引入中药制造领域,能够有效拉齐核算基准线。以现有的桑叶提取物研究为例,该工作正是以LCA为基准,成功确立了中药提取物碳足迹的核算流程^[2]。通过借鉴此类国际标准与先行研究,不仅保障了中药制药单一工艺段碳足迹核算的科学性,也为“绿度”评价提供了先决条件。

1.2 碳足迹核算边界的界定

1.2.1 干燥单元“车间至产品(gate-to-gate)”核算边界的确定 精准的核算碳足迹首先需要对核算边界做出精准的界定。对于专注于工艺与技术的中药制药企业,“车间至产品”的边界更具有实操

性，“车间至产品”表达的是仅关注制药企业内部的加工过程，如干燥、提取等操作。这种边界范围方便企业内部进行碳管理和工艺升级，在评估不同干燥技术对产品碳足迹的影响时，采用“车间至产品”的边界，则会更清晰地揭示工艺参数与碳排放的直接关联。图 1 直观呈现了这一聚焦于制药车间干燥工艺的碳足迹核算范围。如图 1 所示，进入干燥单元的主要输入包括待干燥浸膏、电力、蒸汽或其他热源、载体辅料、工艺溶剂及清洗用水等；输出包括合格干燥产品以及热湿尾气、挥发性有机物、粉尘、清洗废水和物料损失等。通过将核算边界限定于干燥单元，可以更加直接地分析不同干燥技术、运行参数及辅助物料使用对碳排放和多维“绿色”指标的影响。

表1 部分典型中药干燥技术品质特征与核心能耗产生环节对比

Table 1 Comparison of quality characteristics and key energy-consuming stages of selected typical drying technologies used in traditional Chinese medicine manufacturing

Drying technology	Drying quality characteristics	Key energy-consuming stages
喷雾干燥	特点：干燥速度快，可连续化、规模化生产； 局限：高粘度浸膏在特定工况下易发生沾壁，常需加入载体辅料，并存在排风热损失和细粉逸散风险	1. 加热；2. 驱动高速离心雾化器或高压平流泵；3. 风循环；4. 清洗设备所消耗的纯化水以及废水处理
真空带式干燥	特点：低温连续干燥，部分浸膏可减少载体辅料使用； 局限：设备成本高，占地面积大；干燥均匀性受运行参数影响	1. 履带加热；2. 真空维持；3. 机械传动
微波真空干燥	特点：脱水速度快；具备降低平均物料温度的潜力； 局限：加热不均风险高，连续化规模化应用仍受限制	1. 微波发生；2. 真空维持；3. 冷却系统
传统热风干燥	特点：设备成本低，操作难度低，维护成本低； 局限：干燥周期长；可能出现干燥不均、表面硬化或热敏成分损失	1. 加热；2. 通风循环
真空冷冻干燥	特点：低温真空脱水，热敏性及挥发性成分保留较好； 局限：干燥周期长，设备及运行成本高，单位产品能耗较大	1. 制冷；2. 真空维持；3. 冷阱除霜与设备清洗

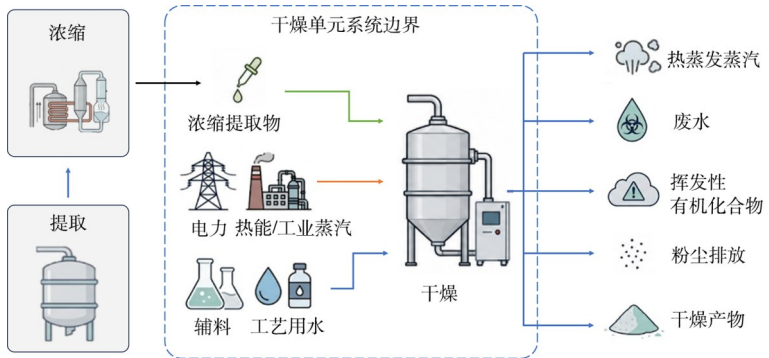


图1 中药制药干燥单元碳足迹核算边界示意图

Fig. 1 Schematic system boundary for carbon footprint accounting of the drying unit in TCM manufacturing

1.2.2 关注制药车间内部工艺段的合理性分析 对于制药车间内部的工艺环节来说，生产环节是中药产品贡献碳足迹的主要环节。中药制药车间包含提取、浓缩和干燥等多个生产单元，不同单元的能源与资源消耗特征存在差异。本文并不比较各单元的能耗高低，而是选择干燥作为具体评价对象。干燥过程中涉及热量输入、水分去除、真空或制冷维持、粉体形成以及辅料使用等多种过程，其碳排放来源与产品质量之间具有较强的耦合关系，因此适合作为探索“碳足迹-绿色”协同评价方法的典型单元。例如，为优化干燥工艺环节降低对资源、能源的消耗，可采用两阶段干燥^[9]或组合干燥^[10]的方法代替传统干燥方法，该操作不仅能够影响产品风味以及热敏成分，也能直接改善对蒸汽、电力等能源的消耗强度。故将核算边界聚焦于车间内部，精准识别企业高排放工艺，针对性开展节能技术改造和过程优化，能够有效降低整个生产体系中的碳足迹。

1.3 碳源识别与数据清单构建

1.3.1 直接排放源 直接排放源，主要是指厂区内的化石燃料，部分传统企业依旧采用煤或燃气锅炉提供热源，是重要的直接排放来源。比如，茶叶或中草药饮片在干燥加工过程中，使用煤或燃气热风炉，整个燃烧过程排放大量的温室气体。目前虽然部分研究更关注电力和蒸汽等间接排放造成的能源消耗，但在缺乏集中供热、采用自备锅炉的企业中，直接燃烧排放的碳足迹核算依然不容忽视^[11]。

1.3.2 间接排放源 间接排放源,尤其是外购电力和蒸汽的消耗是核算中药制药工艺碳足迹的主要研究对象。针对植物加工的研究证实,生产阶段所产生的能耗通常是全生命周期中碳排放的最大贡献者。以绿茶生产的碳足迹核算研究为例,其加工阶段的碳排放高度集中于杀青和干燥两个环节,这两个过程因消耗大量外购电力与热能,导致其碳排放占加工阶段总排放的 57%^[12],这种高碳排过程在中药制药领域十分常见。在中药干燥工艺中,喷雾干燥的进风加热与系统排风以及真空冷冻干燥的制冷与升华脱水,都属于高碳排的操作,均需消耗大量电能和热能。此外还有辅助性的公用工程,如工艺用水、压缩空气及环保处理设施等同样会产生间接排放。所以,在构建生命周期清单(LCI)时,应系统收集核心设备的电力消耗、蒸汽用量、工艺用水量及其他公用工程活动数据。这些底层活动数据的准确性,将直接决定最终碳足迹核算与“绿度”评价结果的科学性与可靠性。

1.3.3 物料隐含碳排放 物料隐含碳排放是指各生产物料在被用于投入到制药之前,需要经历收集获取、加工和运输等多个阶段,最终释放出来的温室气体即物料在这些阶段所累积的隐含碳。但是在中药制药的工艺环节中,所用到的关键辅料和包装耗材才是物料隐含碳含量的核算重点。例如,在干燥的工艺环节中,通常会加入麦芽糊精等载体辅料用于改善药物的成型性,但生命周期评价研究表明,这类载体辅料的上游农作物种植阶段与载体的水解加工阶段都会引入大量的隐含碳,因此更改对药物与合成载体的比例设定,不仅改变了药物的成型性,还会直接影响单位粉体的最终碳负荷^[13];最后在包装环节中,通过 LCA 对比研究,证实了包装材质的选择对碳排放的影响同样深远,如果用含有再生聚合物或含有新型生物基复合材料的包装,替代传统化石基塑料或玻璃容器,可大大降低该环节的碳足迹^[14]。因此,不能仅局限于通过车间能耗来核算中药碳足迹,必须追踪各环节所用的物料,再通过这些物料向上游继续追溯并构建出完整的物料隐含碳清单。目前,中药特定辅料本土化 LCI 的缺失,已经成为当前开展工艺精准绿度评价的核心挑战。

1.4 核算模型与关键因素

“活动数据×排放因子”这一模型是目前用于碳足迹核算的基本模型。其通过活动数据来量化实际引发碳排的物理消耗规模,如在车间生产工艺流程中所消耗的电力度数(kWh)、燃煤吨数(t)、蒸汽焦耳数(MJ)等。排放因子即将这些不同维度的物理消耗转换成统一维度的二氧化碳当量折算系数。此逻辑对应干燥工艺中,核算人员需要先获取的相关活动数据可能包括干燥机的运行时间、蒸汽消耗量、特定溶剂的投入量等,再乘以电力和热力的排放因子^[15]。此模型理论上较为简单,但其准确性高度依赖于活动数据监测的完备性和排放因子的代表性。在复杂工艺中,需要把工艺分解为多个独立的操作,分别核算后再加和。干燥工艺相关碳足迹排放因子列于表 2。

表 2 中药制药干燥工艺温室气体排放因子参考清单

Table 2 Reference inventory of greenhouse gas emission factors for drying processes in TCM manufacturing

Category	Energy/input	Application scenario	Emission factor	Unit	Data source
动能	全国电网平均电力	驱动雾化器、蠕动泵、引风机、真空冷冻干燥机的压缩机与真空泵	0.570 3	kg CO ₂ eq/kWh	[2]
热能	工业蒸汽(0.8~1.2 MPa)	喷雾干燥、热风干燥进风换热器的间接加热源	0.34	kg CO ₂ eq/kg	[16]
热能	管输天然气(工业用)	喷雾干燥塔直燃式热风炉燃烧产热	2.16	kg CO ₂ eq/m ³	[17]
干燥载体	麦芽糊精	调节喷雾干燥药载比、提高固含量及玻璃化转变温度的主流赋形剂	1.90	kg CO ₂ eq/kg	[14]
干燥载体	药用乳糖	常用于共无定形、固体分散体或喷干载体的对比替代物	3.64	kg CO ₂ eq/kg	[18]
挥发溶剂	无水乙醇	喷干前料液配制阶段引入,随后在干燥中被挥发蒸发	1.45	kg CO ₂ eq/kg	[19]
冷媒物料	制冷剂 R404A	真空冷冻干燥(冷阱)设备运行及维修过程中的逃逸逸散	3 922.0	kg CO ₂ eq/kg	[20]
公用工程	纯化水	喷干料液的固含量调节用水,以及干燥塔的在线清洗	0.26	kg CO ₂ eq/m ³	[17]
废弃物	工业废水处理	处理干燥设备清洗产生的含高浓度有机物废液	0.65	kg CO ₂ eq/m ³	[21]

2 中药制药工艺“绿度”评价方法初探

2.1 “绿度”概念的引入与多维必要性

2.1.1 单一指标在干燥工艺中的局限性 碳足迹是衡量温室气体排放的关键指标,其对于推动中药制药行业低碳转型的发展也具有较大影响。但干燥环节,是一个高能耗的热质传递过程,只依赖碳足迹评价工艺的“绿色”程度存在明显局限性。对工艺的“绿色”程度重视主要是由于全球气候变暖等

问题,而对于碳排的改善有时会与中药产品本身的物质属性产生冲突。例如,在真空冷冻干燥过程中需要长时间使用高能耗的压缩机与真空泵,而压缩机与真空泵的碳足迹通常是喷雾干燥的数倍^[22];但冷冻干燥的方式能够最大程度地保留中药浸膏中的热敏性活性成分(如黄酮、多酚),且冻干后的中药浸膏在复水性上表现优异^[23]。如果为了降低冷冻干燥过程中的碳排而降低搁板温度,可能会出现干燥不完全、水活度(*aw*)超标等问题,最终导致微生物滋生或粉体结块腐败^[24]。因此,仅将碳足迹作为评价工艺“绿色”程度的标准,将会掩盖工艺在粉尘污染风险、产品质量妥协、制冷剂生态毒性等方面的综合表现。构建中药干燥工艺“绿色”评价体系,必须在低碳排与高质量、高安全之间继续探索,以寻找多维度的平衡。

2.1.2 绿色化学 12 原则在中药干燥工艺中的启示与拓展 绿色化学 12 项原则的基础理念为评估化学过程的可持续性提供了核心框架^[25-26],可用于重塑中药干燥“绿色”评价,在中药干燥这一领域中,绿色化学 12 项原则可直接转化为工艺优化的工程导向:

提高能源效率(原则 6):干燥是制药最耗能的单元之一,采用热泵辅助干燥或闭路循环喷雾干燥,可大幅回收尾气潜热,直接践行节能原则^[27]。

实时分析防污染(原则 11):引入过程分析技术(PAT),如在线近红外光谱实时监测物料水分^[28],精准判断干燥终点,防止过度干燥带来的能源浪费和热降解^[29]。

更安全的溶剂(原则 5)与防废(原则 1):在含醇浸膏的喷干过程中,采用闭式氮气循环系统替代开放式空气系统,能通过降低系统氧浓度减少燃烧和爆炸风险^[30]。

因此,中药干燥的“绿色”应植根于上述原则,并拓展至辅料利用率、热敏成分保留率及装备本质安全等特色维度。

2.2 现有的绿色化工指标在干燥工艺的适用性评析

2.2.1 E-因子(E-factor)与粉体收率的映射 每生产 1 千克产品所产生的废物千克数称为 E-因子^[31]。在中药产品的干燥环节中蒸发掉的水分或溶剂、以及未被成功收集的药粉都是这些废物的主要来源。尤其是中药膏剂在喷雾干燥过程中,大量半干药膏会粘附在塔壁上,最终焦化成固体废弃物,这就是一些中药产品在喷雾干燥过程中普遍存在的“粘壁现象”。如果一项中药的喷干工艺产率仅有 40%^[15],那么为了完成前期提取和浓缩等阶段所投入的物料和能源,最后将有 60%在此转化变成“废渣”,从而导致系统全局 E-因子都受到影响。因此,在中药干燥工艺中,E-因子必须与“粉体回收率”绑定,即工艺的回收率越低,其对环境带来负担也就越重。

2.2.2 过程质量强度(PMI)与固含量、药载比的关联 过程质量强度指生产单位产品消耗的所有物料总质量^[32]。对于中药干燥,PMI 的分子不仅包含中药有效基质,还包含了被大量消耗并最终蒸发的“水/溶剂质量”,以及为防粘壁而加入的干燥载体(如麦芽糊精、微晶纤维素)质量。研究表明,在入塔前增加料液的固含量,能大幅减少干燥过程中需要蒸发的水分,从而达到显著降低 PMI 和能耗的目的^[33];在干燥过程中为了防止粘壁会加入麦芽糊精或微晶纤维素等载体,因此改变载体量(药载比)的设定也极为关键,常用的载体如麦芽糊精自身带有约 1.90 kg CO₂eq/kg 的上游隐含碳足迹^[33]。但若只盲目增加载体比例,虽能改善成型性,却也会极大推高工艺整体的 PMI 和物料碳负荷。

2.2.3 原子经济性向“热敏成分保留率”的演变 在合成反应中原料转化为产物的效率即原子经济性。由于中药干燥不是化学合成反应而是物理脱水过程,那么原料转化为产物的效率也应当演变为“热敏成分保留率”或“活性成分保留率”。有些中药中富含的花青素、苷类化合物和挥发油等活性成分在强热对流或微波辐射的条件下,极易发生氧化和热降解^[34]。在一份抗坏血酸和总酚的研究中,优化喷雾干燥的进风温度,可在保证干燥的同时,使有效成分的保留率达到最优^[9]。所以这一指标确保了制药过程的核心目的:药效的最大化保留。

2.3 中药干燥工艺专属多维“绿色”指标体系构建

本评价体系并未脱离第 1 节所构建的碳足迹核算框架,而是在碳足迹核算框架基础上将底层的物理基础进行了映射。简单来说,就是将车间内设备因消耗热能和电能产生的直接或间接碳排放,转换成能效维度的“热能回收率”与“单位除水能耗(SEC)”两个指标;使用资源维度的“辅料碳负担率”将辅料与上游加工所产生的物料隐含碳对应;全球变暖潜势(GWP)的制冷剂泄露风险,使用和环境与

安全维度相关的“制冷剂 GWP”进行直接对应。通过这种对底层物理基础的映射, 底层碳足迹数据将更加能够密切融入多维绿度评价的矩阵之中。

2.3.1 质量维度的热敏成分保留率与粉体收率 中药的绿色不能选择降碳但忽略药效。以原子经济性为基础, “热敏成分保留率”可以作为首要的质量维度考察目标。此外 E-因子也可以映射为“粉体收率”, 物料在处理过程中出现沾壁会造成严重浪费。此标准弥补了单纯追求低能耗而忽略产品质量的盲区, 也确保了制药过程的核心目的不会偏移。

2.3.2 能效维度的单位除水能耗与热能回收率 能效是决定干燥工艺整体效率的主要因素之一。SEC 是干燥工程学中最为核心的量化指标, 即干燥过程中, 去除单位质量水分所消耗的能量^[35-36]。但是由于干燥技术的不同, 它们之间存在的 SEC 差异也很大, 如果把 SEC 作为“绿度”评价的首要指标, 将使热风、微波、冻干等不同设备的能效基准更加统一。此外, 还可以通过热能回收率对系统排放尾气、显热及潜热的再利用能力进行评估。高效的热能集成(如二级冷凝余热回收)能大幅降低直接碳排放, 是推动干燥工艺进一步迈向绿色环保的硬性指标。

2.3.3 资源维度的辅料碳负担率与溶剂闭环率 在研发生产过程中, 为了维持药物的形态、保障药物的稳定性或是控制药物的释放速度等目的, 会加入一定量的辅料(如赋形剂)以达到目标效果, 而常用的辅料一般都存在上游隐含碳。因此由 PMI 演变而来的“辅料碳负担率”, 主要适用于评估单位粉体中赋形剂带来的上游隐含碳, 逆向驱使工艺寻找最小必要药载比。并且在处理含醇浸膏类药物时的“溶剂闭环率”也是实现物料循环的关键之一。

2.3.4 环境与安全维度的制冷剂全球增温潜势、粉尘与防爆 环境与健康维度主要是针对只侧重于高产率或低能耗的制衡。首先是对非 CO₂ 温室气体与臭氧层物质消耗的评估: 例如常用的冻干机出现制冷剂微量泄漏的情况, 将会对生态环境产生极大的影响, 导致相关工艺阶段在节能上刚取得的“绿度”急速下降^[20]; 其次是粉尘逸散与防爆, 加喷雾干燥或流化床产生的超细中药粉体, 若粉体密度逐渐积聚增多, 将会存在粉尘爆炸的风险; 并且其作为具有药理活性的气溶胶, 长期吸入会对车间操作人员的呼吸道健康构成严重威胁。因此将控制车间粉尘浓度、粉尘防爆设计及定期检查设备密闭性纳入绿度评价, 真正实现了从资源节约到人类健康与本质安全的综合保障。至此, 本研究完整构建了中药干燥工艺的多维“绿度”评价指标体系, 其全景框架如图 2 所示; 将各维度所对应的具体可量化指标及其数据来源, 归纳于表 3 中。



图2 中药干燥工艺多维“绿度”评价指标体系全景图

Fig. 2 Overview of the multi-dimensional “greenness” evaluation indicator system for TCM drying processes

GWP denotes global warming potential and represents the climate impact of a unit mass of a greenhouse gas relative to CO₂ over a specified time horizon; “screening for high-GWP refrigerants” refers to the greenhouse effect resulting from refrigerant leakage into the atmosphere; “dust and explosion prevention” refers to the assessment of dust emissions and explosion risks (GWP 为全球增温潜势, 用于表征单位质量温室气体相对于 CO₂ 在规定时间尺度内的气候影响; “制冷剂高 GWP 排查”是指制冷剂一旦泄漏到大气中, 产生的温室效应; “粉尘与防爆”是指粉尘逸散与爆炸风险评估)

2.4 绿度评价的可视化方法与量化模型

通过以上研究, 在明确了多维“绿度”评价指标后, 还需要引入一些科学的总结方法, 将单位各异、属性不同的评价指标整合为更加直观的“绿度”结论。本文将半定量的“惩罚扣分制”与可视化的“多维雷达图”结合, 构建更加直观的“绿度”评价模型。

2.4.1 半定量的惩罚扣分制 在中药的处方筛选阶段, 半定量的惩罚扣分制被认为是一种可以评价绿色水平的便携方法。总分 100 分是假定为最理想的状态, 即零碳排放、100% 产率及无安全风险理论下的干燥工艺。在进行真实评价时, 通过实际工艺与理想状态的偏离程度对总分进行扣分: 如辅料碳

负担率过高、热能未回收，每一个指标下都设有具体的惩罚分值^[37]。并且采用极差归一化方法(Min-Max)将惩罚分值进一步映射至0~1的标准得分区间，得到各维度得分。使用各维度得分引入加权综合评价计算综合绿度指数(CGI)，公式如下：

$$CGI = \sum_{i=1}^n (W_i \times S_i)$$

(1)

其中 n 为维度的总数， S_i 为各维度的得分， W_i 为专家经验或其余方法赋予的各维度的权重，在评估不同制备工艺所造成的环境代价时，这种绝对数值具备极高的可行性。

2.4.2 多维雷达图的可视化评价 前期在使用半定量的方法进行指标量化的同时，各维度 S_i 值也可以映射至多维雷达图上用于直观展示。经前期操作，雷达图的核心指标不会局限于积分面积，通过反馈的数值可直观了解工艺的短板。距离雷达图中心最近的坐标轴，意味着此种工艺的不足之处。这种可视化的方法会直观展示工艺的优劣从而为绿色工艺改造方向提供相关指导。

表3 中药干燥工艺多维“绿色”评价指标的定义、计算方法及主要数据来源

Table 3 Definitions, calculation methods, and primary data sources of multidimensional “greenness” evaluation indicators for traditional Chinese medicine drying processes

Evaluation dimension	Indicator	Definition or calculation	Primary data source
产品与质量	热敏成分保留率	$R_q = (\text{干燥产品中目标成分总量} / \text{进料中目标成分总量}) \times 100\%$	进料与产品含量、干基质量
	粉体收率	$Y_p = (\text{收集到的合格粉干基质量} / \text{进料总固形物质量}) \times 100\%$	投料固形物、合格产品干基质量
能量效率	单位除水能耗	SEC=消耗的能量/去除水分的质量，单位 kWh/kg H ₂ O	去除水量、电力、蒸汽及燃料等折算能耗
资源与闭环	热能回收率	$T_h = (\text{实际回收利用热量} / \text{可回收热量}) \times 100\%$	尾气/冷凝热量、实际回用热量
	辅料碳负担率	统一系统边界和功能单位下，干燥过程中辅料投入所产生的上游温室气体排放占工艺总碳足迹的比例	辅料投入量、各辅料碳排放因子及工艺总碳足迹
	溶剂闭环率	$R_s = (\text{回收并用溶剂质量} / \text{投入溶剂质量}) \times 100\%$	溶剂投入量、回收量和回用量
环境与安全	制冷剂高 GWP 排查	$I_r = (\text{制冷剂泄漏量} \times \text{GWP}_{100}) / \text{合格产品质量}$ ，单位 kg CO ₂ eq/kg 产品	补充量/泄漏量、制冷剂种类及 GWP100
	粉尘与防爆	工作场所粉尘检测结果与职业接触限值的符合情况，以及设备密闭、除尘、静电接地、泄爆/隔爆等适用条款的符合比例	粉尘检测记录、设备安全审查、现行职业卫生与粉尘防爆标准

GWP₁₀₀ denotes the 100-year global warming potential, representing the cumulative climate impact of a greenhouse gas over 100 years relative to an equal mass of CO₂, with GWP₁₀₀ of CO₂ defined as 1 (GWP₁₀₀ for 100 年时间尺度全球增温潜势 (100-year global warming potential)，表示某温室气体排放后 100 年内产生的累积气候影响相对于等质量 CO₂ 的倍数，其中 CO₂ 的 GWP₁₀₀ 规定为 1)

3 案例解析：基于多维绿度评价体系的干燥技术应用推演

3.1 干燥工艺与“碳-绿”协同评价

根据上文所述，在整个中药制药的工艺周期中，干燥是连接液态提取物与固体制剂的关键环节。通过单一的碳足迹核算只能反映因脱水耗能所带来的温室效应，无法体现降碳的处理方法对中药质量、辅料消耗及环境安全产生的综合影响。基于此，本节将碳足迹核算与第2节建立的多维“绿色”指标体系结合，从产品质量、能源效率、资源利用以及环境与安全等方面，对典型干燥技术的工艺特征进行映射。这里的重点不是简单比较哪种技术“更绿”，而是展示各项指标如何用于实际评价，并据此找出不同工艺可能存在的短板和改进方向。由于目前缺少统一的物料条件和实测工况数据，本文不对各类干燥技术作普适性的 CGI 排序。

3.2 基于多维评价矩阵的干燥技术特征解析

依据“2.4”节确立的评价法则，不同干燥技术展现出截然不同的特征画像与短板分布。

3.2.1 喷雾干燥 喷雾干燥速度快，可连续进料，也便于放大生产，是中药浸膏干燥中较常用的工艺。产品质量与料液固含量、进出口温度、雾化粒径和物料停留时间密切相关，任何一个参数发生变化，都可能影响最终粉体的状态和收率。对于黏度较大或含糖量较高的中药浸膏，干燥过程中容易出现粘壁和粉体损失^[38]。为了改善成粉效果，生产中往往需要加入麦芽糊精等载体辅料，但这也会增加辅料消耗及其相应的碳负担。喷雾干燥的能耗主要来自进风加热、风机运行和热排风损失，生产过程中还应注意细粉逸散以及粉尘爆炸风险。从工艺优化角度看，喷雾干燥在减少辅料用量、回收排风余热和加强粉尘控制等方面仍有改进空间。不过，其实际绿色表现受物料性质、设备负荷和运行参数影

响较大。在缺少统一系统边界和可比数据的情况下,不宜直接判断其 CGI 水平。

3.2.2 真空冷冻干燥 真空冷冻干燥技术的基本原理是先将物料预冻结,然后在真空条件下使物料中的冰直接升华,以此达到低温脱水的目的。由于整个干燥过程都处在一个低温环境中,所以能够较好的保护部分热敏性和挥发性成分。经过真空冷冻干燥后的产品通常呈现出疏松多孔的结构,复水性能良好^[39]。但是企业所用的干燥设备类型只是影响真空冷冻干燥技术能效的因素之一。在产品干燥过程中存在预冻结温度、升华时间、解吸干燥时间、设备装载率以及真空系统效率等因素,而这些因素都会影响真空冷冻干燥技术的实际能耗。其次产品在冷冻过程中的制冷机组、冷阱和维持真空环境的真空泵需要长时间连续运行,这3个部分的运用会推高单位除水能耗。同时冷冻时所用到的制冷剂的种类及其发生的泄漏情况也会影响工艺的环境表现。因此在产品质量的保护方面运用真空冷冻干燥技术更具优势,但是在判断其整体“绿度”评价时应结合实际能耗、设备装载率、制冷剂的管理水平以及产品本身的价值进行综合分析。

3.2.3 真空带式干燥 真空带式干燥利用低压环境降低物料沸点,并通过连续铺料和分段加热完成干燥。对于物性合适的中药浸膏,物料可在设备内直接干燥成型,既能减少麦芽糊精等载体辅料的加入,也可避免长时间处于高温环境。不过,这一工艺对物料性质和运行参数较为敏感。浸膏黏度、铺料厚度、履带速度、真空度、加热温度和设备负荷都会影响干燥效果。铺料不均或参数控制不稳时,不同位置的物料可能出现终点含水率不一致的问题。真空系统和加热单元也需要持续消耗能源,而设备密闭虽然能减少粉尘逸散,却无法完全消除粉尘及操作安全风险。因此,真空带式干燥在连续低温处理和减少辅料使用方面具有一定优势,但其整体绿色表现仍取决于具体物料和实际运行条件,需要结合真实工况进行计算和评价。3种典型中药干燥技术的多维“绿度”指标示意性映射见图3。

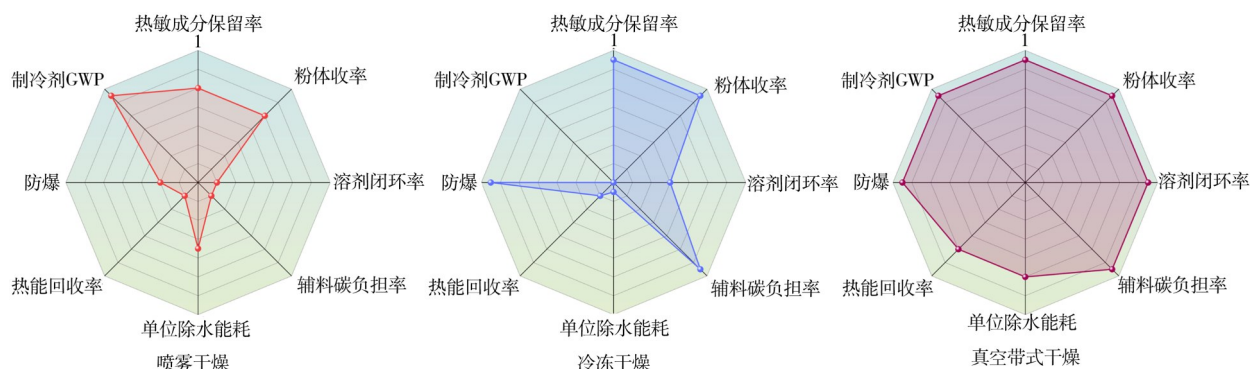


图3 3种典型中药干燥技术的多维“绿度”指标示意性映射

Fig. 3 Schematic mapping of multidimensional “greenness” indicators for three typical drying technologies in traditional Chinese medicine manufacturing

The indicator profiles shown in the figure are intended only as a schematic representation of the potential advantages and limitations inferred from available evidence. They are not calculated from measured data obtained using the same material, a unified functional unit, and identical operating conditions; therefore, they do not represent measured indicator scores, CGI values, or industry rankings for the respective technologies. (图中各指标分布仅用于示意基于经验证据推断的潜在优势与不足,未依据同一物料、统一功能单位和相同运行条件下的实测数据计算,不代表各技术的实测指标得分、CGI值或行业排名)

3.2.4 评价推演结论与工程导向 从上述指标映射可以看出,不同干燥技术各有优势,也各有短板。喷雾干燥适合连续化和规模化生产,但粘壁、载体辅料添加、尾气热损失和粉尘控制等问题不容忽视。真空冷冻干燥对部分热敏性物料的品质保护较好,但其能效很大程度上取决于预冻结条件、升华时间、设备装载率、真空系统效率以及制冷剂管理水平。真空带式干燥兼具连续低温处理和减少部分载体辅料使用的潜力,但干燥是否均匀、能源利用是否合理,仍会受到物料性质、铺料状态和运行参数的影响。中药干燥工艺的绿色升级,不能简单理解为降低干燥温度或减少碳排放,也不能脱离具体物料和生产条件,直接对不同技术排出高下。工艺选择和参数优化需要统筹考虑物料特性、产品质量要求、生产规模、设备负荷、能源结构、辅料需求及安全管理水平。只有统一功能单位、系统边界、评价标准、测算方法和权重设置,并以实际运行数据为基础,所得CGI值才具备横向比较意义。

4 总结与展望

“唯低碳论”的传统局限长久以来一直是中药绿色转型不可绕开的问题，本文通过“惩罚扣分-多维雷达图”的有效结合，使构建干燥工艺新型生态画像变得可能，实现了从单一减碳向多维绿度层面的进步。干燥体系具有高能耗与高热敏的特点，所以其工艺的升级必须兼顾质量、能效、资源与环境多重维度。

尽管“绿度”理论框架已具雏形，但其产业化落地仍面临诸多困境：一方面，底层数据壁垒导致中药专属的精细化生命周期清单缺失，辅料隐含碳难以精确溯源，且碳足迹削减与品质保障间缺乏标准化的多维权衡意识，并且加权综合绿度指数中关于权重一说并没有专门的体系建立；另一方面，高绿度耦合干燥装备面临高昂的定制成本与工艺磨合风险，形成阻碍药企技术更迭的“能效-质量-成本”不可能三角。为稳步解决上述困境，未来中药绿色制造需从装备革新、算法赋能与生态构建三个方面发力。在装备革新上，为突破传统热力的能效困境，应大力推广新兴技术，如微波、热泵耦合等，除此之外，使用氮气闭式循环系统也可从根源上实现溶剂的闭环回收与零粉尘防爆；在工艺优化上，“数字孪生”使用机器学习给出了新的答案，利用算法自主寻找能效与质量双赢的“帕累托最优解”。事实上，已经有学者基于人工神经网络与智能寻优算法，在穿心莲内酯的喷干工艺中跑通了这一逻辑，在保证高溶出率的前提下，还精准锁定了系统能耗最低的参数^[40]；在宏观生态上，行业应带领企业、厂家共同建立开源的中药专属绿度清单数据库，以破解数据分析上面临的难题，并将企业高绿度评价结果与绿色信贷、税收减免等政策相结合，全面驱动中药工业向智能化、低碳化的深度绿色时代迈进。

参考文献：

- [1] Cespi D. *Green Chem.*, **2025**, 27(39): 12107–12114.
- [2] Ci Z M, Ou J X, Yu Q, Zheng C, Pei Z Q, Qu L P, Yang M, Han L, Zhang D K. *China J. Chin. Mater. Med.* (慈志敏, 欧建祥, 余强, 郑川, 裴照卿, 瞿礼萍, 杨明, 韩丽, 张定堃. 中国中药杂志), **2025**, 50(1): 120–129.
- [3] Folkerts S, Hoepfner M G, Guillén-Gosálbez G, Pérez-Ramírez J, Carreira E M. *J. Am. Chem. Soc.*, **2025**, 147(44): 40944–40957.
- [4] Kapalavavi B, Doctor N, Zhang B, Yang Y. *Molecules*, **2021**, 26(6): 1634.
- [5] Tu Y, Li L, Fan W, Liu L, Wang Z, Yang L. *Molecules*, **2022**, 27(14): 4339.
- [6] Yudhistira B, Adi P, Mulyani R, Chang C K, Gavahian M, Hsieh C W. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **2024**, 23(5): e13413.
- [7] Ibrahim A, Amer A, Elsebae I, Sabahe A, Amer M A. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, **2024**, 12: 1355133.
- [8] Ibrahim A, Elsebae I, Amer A, Aboelasaad G, El-Bediwy A, El-Kholi M. *J. Food Sci.*, **2023**, 88(9): 3859–3878.
- [9] Sun X, Wang C, Long X, Han S, Xu W, Chen T, Liu J, Wen B, Li M. *Food Chem. X*, **2025**, 32: 103345.
- [10] Abbaspour-Gilandeh Y, Kaveh M, Fatemi H, Aziz M. *Foods*, **2021**, 10(5): 1006.
- [11] Kibet J J, Letema S. *PLoS Clim.*, **2024**, 3(10): e0000329.
- [12] He M, Li Y, Zong S, Li K, Han X, Zhao M. *Agronomy*, **2023**, 13(2): 364.
- [13] Salgado-Aristizabal N, Agudelo-Patiño T, Ospina-Corral S, Álvarez-Lanzarote I, Orrego C E. *Processes*, **2023**, 11(8): 2290.
- [14] Bassani F, Rodrigues C, Freire F. *Waste Manage.*, **2024**, 175: 1–11.
- [15] Costa F S, Santos J C C, Costa e Silva M D, Cruz M D S, Santos A A D L, de Oliveira C R, de Oliveira L F, Corrêa J L G. *J. Sci. Food Agric.*, **2026**, 106(4): 2527–2541.
- [16] Wernet G, Bauer C, Steubing B, Reinhard J, Moreno-Ruiz E, Weidema B. *Int. J. Life Cycle Assess.*, **2016**, 21(9): 1218–1230.
- [17] Khosravi H, Rashidi A, Shourkaei M A. *Environ. Dev. Sustain.*, **2023**, 26(3): 5843–5867.
- [18] Milani F X, Nutter D, Thoma G. *J. Dairy Sci.*, **2011**, 94(9): 4243–4254.
- [19] Wang M, Wu M, Huo H. *Environ. Res. Lett.*, **2007**, 2(2): 024001.
- [20] Llopis R, Calleja-Anta D, Maiorino A, Nebot-Andrés L, Sánchez D, Cabello R. *Int. J. Refrig.*, **2020**, 118: 279–289.
- [21] Gallego-Schmid A, Tarpani R R Z. *Water Res.*, **2019**, 153: 63–79.
- [22] Ma L, Zhao S, Shi L. *J. Clean. Prod.*, **2016**, 112(5): 4367–4376.
- [23] Ciurzyńska A, Lenart A. *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, **2011**, 61(3): 165–171.
- [24] Schuck P, Blanchard E, Dolivet A, Méjean S, Onillon E, Jeantet R. *Le Lait*, **2005**, 85(4/5): 295–304.
- [25] The Academic Committee of the 7th Mogan Mountain International Conference on Green Pharmaceuticals. *Chin. J. Pharm.*

- (第七届绿色制药莫干山国际会议学术委员会. 中国医药工业杂志), **2025**, 56(4): 564–565.
- [26] Bosona T. *Agriculture*, **2024**, 14(3): 461.
- [27] Kumar Y, Arora V, ISME J. *Thermofluids*, **2019**, 5(2), 10–29.
- [28] Lü H L, Huang Y H, Zhang T, Zhang Y, Huang X F, Zhang F S, Yu B L, Chen Z W. *Chin. J. Med. Chem.* (吕洪亮, 黄元红, 张挺, 张勇, 黄晓芳, 张发森, 余碧莲, 陈忠文. 药物化学), **2024**, 12(1): 27–32.
- [29] Wang X, Yang Y L, Sha X, Song W, Zhang Y, Yu H S, Li Z, Li W L. *J. Instrum. Anal.* (王玺, 杨应莲, 沙鑫, 宋纹, 张营, 余河水, 李正, 李文龙. 分析测试学报), **2024**, 43(11): 1821–1828.
- [30] Wang X Y, Koller R, Wirth M, Gabor F. *Int. J. Pharm.*, **2012**, 436(1/2): 738–743.
- [31] Li J. *Determination of Mycotoxins in Different Foods by Deep Eutectic Solvents Improved Pretreatment Technology—Taking Milk and Capsicum as Examples*. Guiyang: Guizhou Medical University(李进. 基于低共熔溶剂改良的前处理技术测定不同食品中的霉菌毒素——以牛奶、辣椒为例. 贵阳: 贵州医科大学), **2024**.
- [32] Zhang Q Q. *Green Analysis and Optimization of TDI Production Process*. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology(张晴晴. TDI生产工艺的绿色分析与优化. 青岛: 青岛科技大学), **2020**.
- [33] Caliskan G, Dirim S N. *Powder Technol.*, **2016**, 287: 308–314.
- [34] Pu Y Y, Sun D W. *Food Chem.*, **2015**, 188: 271–278.
- [35] Teymori-Omran M, Askari Asli-Ardeh E, Taghinezhad E, Motevali A, Szumny A, Nowacka M. *Appl. Sci.*, **2023**, 13(13): 7612.
- [36] Yang K S, Hamid K, Wu S K, Sajjad U, Wang C C. *Processes*, **2021**, 9(7): 1216.
- [37] Van Aken K, Strekowski L, Patiny L. *Beilstein J. Org. Chem.*, **2006**, 2: 3–9.
- [38] Tontul I, Topuz A. *Trends Food Sci. Technol.*, **2017**, 63: 91–102.
- [39] Bhatta S, Stevanovic Janezic T, Ratti C. *Foods*, **2020**, 9(1): 87.
- [40] Fang G P, Jia C H, Guan Z Q, Li F, Li Z, Li W L. *AAPS PharmSciTech*, **2026**, 27: 115.

(责任编辑: 盛文彦)