

• 药事管理 •

双碳背景下中药制药企业碳足迹产生环节与核算模型

慈志敏¹, 余 强¹, 马鸿雁¹, 郑 川^{1,2}, 尚 强^{3,4,5}, 李 东^{3,4,5}, 杨 明⁶, 韩 丽^{1*}, 张定堃^{1,2*}

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

2. 成都中医药大学 天府中医药创新港, 四川 彭州 611930

3. 四川光大制药有限公司, 四川 彭州 611930

4. 四川省抗病毒中药产业化工程技术研究中心, 四川 彭州 611930

5. 国家中药现代化工程技术研究中心川药资源分中心, 四川 彭州 611930

6. 江西中医药大学 创新药物与高效节能降耗制药设备国家重点实验室, 江西 南昌 330004

摘 要: 随着全球变暖导致的问题日趋严重, 我国提出了 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的“3060 双碳目标”。目前, 中药制药行业缺乏相应的碳排放评价方法与碳足迹核算模型, 难以精准指导制药工艺改进与新技术、新装备节能评价, 成为中药绿色制药需要解决的首要问题。因此, 基于碳足迹概念, 初步提出中药制药行业的碳足迹核算方法, 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, 以期全面统计和分析中药制药行业的碳排放, 为中药制药企业的绿色制造与节能减排提供参考。

关键词: 中药制药; 碳足迹; 绿色制造; 碳达峰; 碳中和

中图分类号: R288 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2022)24-7980-09

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2022.24.036

Carbon footprint generation link and accounting models of traditional Chinese medicine manufacturing companies in the context of double carbon

CI Zhi-min¹, YU Qiang¹, MA Hong-yan¹, ZHENG Chuan^{1,2}, SHANG Qiang^{3,4,5}, LI Dong^{3,4,5}, YANG Ming⁶, HAN Li¹, ZHANG Ding-kun^{1,2}

1. Key Laboratory of Distinctive Chinese Medicine Resources in Southwest China, College of Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China

2. Tianfu TCM Innovation Harbour, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Pengzhou 611930, China

3. Sichuan Guangda Pharmaceutical Co., Ltd., Pengzhou 611930, China

4. Sichuan Provincial Engineering Research Center for Antiviral Chinese Medicine Industrialization, Pengzhou 611930, China

5. National Engineering Research Center for Modernization of Traditional Chinese Medicine and Sichuan Medicine Resource Sub-center, Pengzhou 611930, China

6. State Key Laboratory of Innovative Drug and High Efficiency and Energy Saving Pharmaceutical Equipment, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

Abstract: As the problems caused by global warming become more and more serious, China has proposed the “3060 double carbon target” of reaching the carbon peak by 2030 and becoming carbon neutral in 2060. At present, traditional Chinese medicine pharmaceutical industries lack corresponding carbon emission evaluation methods and carbon footprint accounting models, which make it difficult to accurately guide pharmaceutical process improvement and energy-saving evaluation of new technologies and

收稿日期: 2022-08-13

基金项目: 四川省科技计划资助项目 (2022YFS0431)

作者简介: 慈志敏, 讲师, 研究方向为中药绿色制造新技术。E-mail: cizhimin@163.com

*通信作者: 张定堃, 副教授, 研究方向为中药制药与品质评价新技术。E-mail: zhangdingkun@cdutcm.edu.cn

韩 丽, 教授, 研究方向为中药制剂新技术。E-mail: hanliy@163.com

equipment, making it the primary problem that needs to be solved for green pharmaceuticals in traditional Chinese medicine. Therefore, based on the concept of carbon footprint, a carbon footprint accounting method for traditional Chinese medicine pharmaceutical industry was initially proposed in this paper, the pharmaceutical processes with high carbon emissions were sorted out. The accounting elements for the production of root traditional Chinese medicine tablets and traditional Chinese medicine oral liquids were briefly described as examples, in order to comprehensively count and analyze the carbon emissions of traditional Chinese medicine pharmaceutical industry, and provide a reference for green manufacturing and energy conservation and emission reduction of traditional Chinese medicine manufacturing companies.

Key words: traditional Chinese medicine manufacturing; carbon footprint; green manufacturing; carbon peaking; carbon neutrality

全球气候变暖已成为当下世界热点问题,而温室气体排放是气候变化的主要原因之一。为应对气候变化难题,世界各国相继做出了各自的努力。2020 年 9 月 22 日,中国承诺:“采取更加有力的政策和措施,二氧化碳(carbon dioxide, CO₂)排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”^[1]。面对紧迫的碳中和任务,需要全社会及各个行业相互配合共同努力完成。中药制药行业作为制造业的子行业,是我国国民经济和社会发展的的重要支柱产业之一。同时,作为传统特色产业,中药制药也是能耗较高,排放量较大的产业之一,其生产过程一般包括中药材种植、中药饮片炮制、中药制剂生产、产品流通销售等。特别是中药工业化生产阶段,其电能、热能、有机溶剂等消耗较大,生产过程中会产生大量废水和废渣等,碳排放量较多。因此,在双碳背景下关注中药制药企业碳排放,研究中药制药过程碳足迹统计核算方法具有重要的现实意义。

1 碳足迹及其核算方法

“碳足迹”的概念始于 20 世纪 90 年代 Wackernagel 等^[2]提出的“生态足迹”一词,一般指商品或服务在生产、运输、使用、处置的整个生命周期内直接或间接排放的温室气体总量,以 CO₂ 当量表示,包括 CO₂、氧化亚氮、甲烷、全氟化合物、氢氟碳化合物、三氟化氮 6 类,碳足迹是衡量气候变暖问题的重要工具。通过分析中药制药企业碳排放,评估温室气体排放量,不仅能为减排增效提供

科学的理论指导,还能提供具体的数据支持。目前核算碳足迹常用的方法一般有生命周期法、排放因子法、投入产出法、质量平衡法、实测法等^[3]。

1.1 生命周期法

生命周期法用于评估产品或某一活动在整个生命周期内对环境造成影响的方法,它将原料的采制以及产品的制造、使用、废弃物处置的过程称为产品的全生命周期。该评价方法主要包括目的和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释 4 个步骤^[4],具体流程见图 1。生命周期法的优势在于它量化了从摇篮到大门再到坟墓的整个生命周期的环境负担,作为一种能够全面系统评估某一产品对环境影响的工具,目前已在国内外被广泛用于碳足迹计算。但该方法也存在一定的局限性,如不确定因素多,碳排放核算边界确定方法不统一,某一部门、过程的排放数据难以获得等。此外,整个生命周期评价过程需要强有力的数据支撑,数据是否可靠将会直接影响分析评价结果的可信度^[5]。

1.2 排放因子法

排放因子法是由联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出的一种碳足迹估算方法,也称排放系数法或 IPCC 清单法^[6],是目前国际上常用的碳足迹核算方法。排放因子法以气体排放清单为基础,将每个排放源的排放数据与其对应的排放因子相乘并加和,计算得出该排放源的碳排放量,计算公式如下:

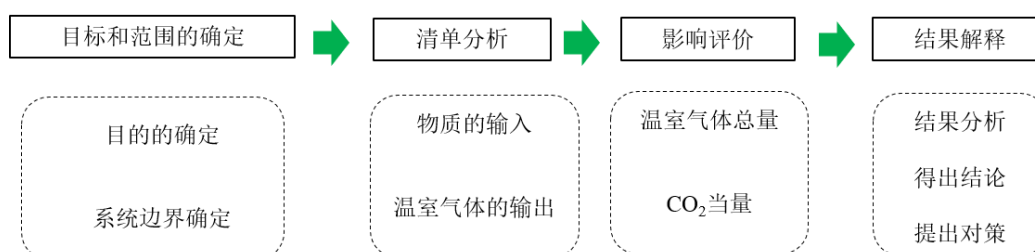


图 1 生命周期评价法的步骤

Fig. 1 Steps of life cycle assessment

$$E_c = \sum_i AD_i \times EF_i \quad (1)$$

式(1)中 E_c 为 CO_2 排放量, AD_i 为能源活动水平数据, 即与 CO_2 排放直接相关的 i 类能源消耗量, EF_i 为碳排放因子。

该方法简单易理解且具有普适性, 被广泛用于宏观和微观的碳排放核算中, 但也存在一定缺陷, 如不同地区含碳量存在差异性, 排放因子差异大。此外, 该方法很难核算消费过程的隐性碳排放, 在缺少数据的情况下, 核算结果缺乏科学性。

1.3 投入产出法

投入产出法是针对产业部门间的一种较成熟的经济分析方法。其核算方法分为 4 步: 投入产出表的获取与处理、碳足迹模型建立、碳足迹核算及结果分析。该方法需要大量的数据, 计算较繁琐, 适用于国家、城市、工业部门、政府组织及行业间等宏观层面分析^[7]。

1.4 质量平衡法

质量平衡法也有学者称为物料衡算法^[8], 该方法

的基本原理是质量守恒定律, 其核心理念为进入系统和设备的物料总质量和该系统与设备产出物料总质量相同。质量平衡法把工业生产中资源投入、物质生产、废物排放与相关政策互相结合, 以此能在生产活动全过程的角度对温室气体的产生和排放进行计算和分析。质量平衡法非常适合设备经常更换的情景, 但因其需对生产过程的中间环节进行详细的分析, 这对数据来源和详细程度的要求非常高, 且系统误差难以避免, 这在实际应用中想要实现比较困难。目前该方法主要用于工业碳排放核算。

1.5 实测法

实测法是通过国家相关部门的连续计量设施, 对现场的气体体积流量以及浓度等指标进行检测以此来核算温室气体排量的方法。此方法简单直接且计算结果误差较小, 但是操作难度高, 人力物力消耗大, 成本较大。因此, 国内外很少应用实测法对温室气体排放进行计算^[9]。

各种碳足迹核算方法的特点及适用范围见表 1。

表 1 各种碳足迹核算方法比较

Table 1 Comparison on various carbon footprint calculation methods

方法	优势	局限	适用范围
生命周期法	碳足迹分析较全面, 可分析直接及间接碳排放; 可全面系统评估生命周期内产品对系统环境的影响	碳足迹核算边界确定方法不统一, 不确定因素多	单个产品或流程的整个生命周期 (从摇篮到坟墓)
排放因子法	计算简单, 适用范围广, 宏观、中观及微观均可	排放因子地区差异大, 难核算间接/隐性碳排放	碳排放源较简单且相互干扰不明显
投入产出法	可直观分析国家、省市及行业间等宏观层面直接或隐含碳排放	计算较繁琐, 需要大量数据	宏观层面及行业间相互关联的碳排放
质量平衡法	基于质量守恒, 结果相对可靠, 适于宏观及中观	计算过程复杂工作量大, 数据获取困难	碳排放源复杂区域或生产过程
实测法	方法简单, 直接误差小, 适用于微观	成本高, 数据获取困难	微观, 小区域、简单生产链等有能力获得一手数据的自然排放源

2 碳足迹产生的主要途径

目前, 碳足迹研究多集中于建筑业、钢铁业、煤化工工业和交通运输业等行业^[5]。中药制药行业碳足迹研究还处于空白状态, 尚缺乏相关的行业核算标准和指南。中药制药企业在生产过程中大量消耗蒸汽、电能等资源, 生产后还会产生大量的废水、废渣, 无论是能源消耗还是废弃物处置都会产生相应的碳足迹, 对其碳足迹进行定量核算和分析, 能帮助其高效、准确、科学地制定减排战略。

中药制药过程主要包括提取、纯化、浓缩、干

燥、制剂等环节, 然而这些环节相较于化学药生产, 存在链条长、环节多、批量小等特点, 连续化生产不足、高效节能新技术应用不够、生产效率低、能耗高等缺点^[10-11], 最终导致大量的碳足迹产生。除此之外, 空调系统、应急燃油发电机、蒸汽锅炉以及冷库等辅助生产设施的应用将会消耗高额电力、热力和燃料, 由此产生直接排放或间接排放。最后, 废水、废渣处理产生的碳足迹也应当包含在中药制药企业生产碳足迹评价生命周期之内。中药制药企业最终碳足迹产生的主要途径见图 2。

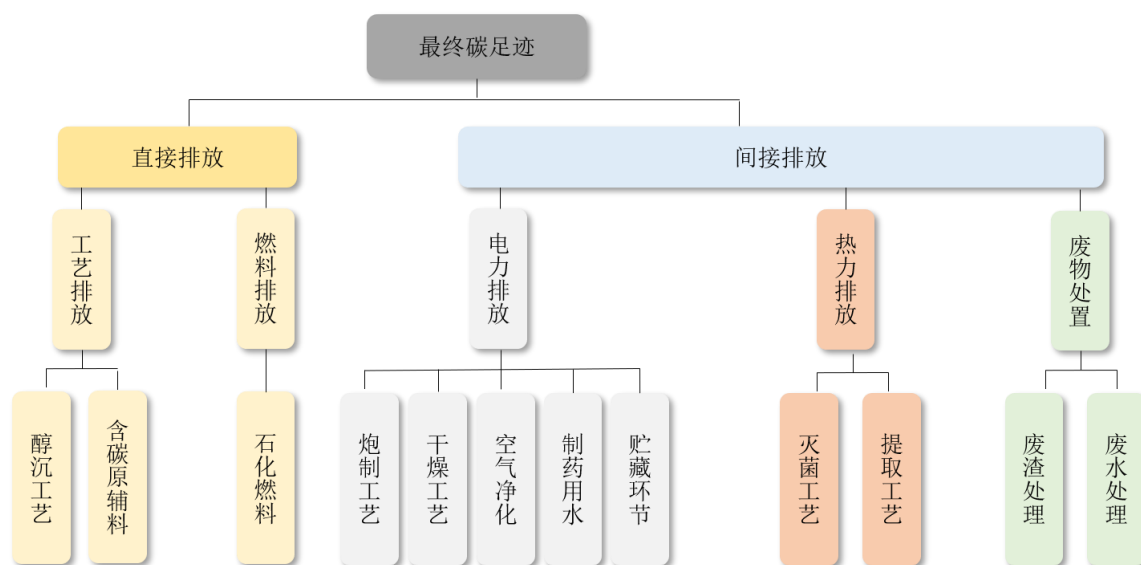


图 2 中药制药过程中碳足迹产生主要途径

Fig. 2 Main pathways of carbon footprint generation in traditional Chinese medicine pharmaceutical processes

2.1 中药制剂生产系统

中药制剂多由中药提取物作为原料，提取、浓缩与纯化工艺对中药制剂的疗效影响非常大。但是，提取与浓缩过程会消耗大量的饱和蒸汽和冷却循环水^[12]，纯化工艺中醇沉环节以及醇提工艺会引入乙醇等有机溶剂，使得提取与浓缩工艺成为中药制剂过程中能耗最高、最集中的环节。蒸汽的大量使用会产生高额热力消耗；由于乙醇的使用，一方面乙醇的挥发直接造成碳的输出，另一方面会导致中药制药废水处理难度加大。热力的高额消耗和乙醇的使用，最终会产生大量碳足迹。

中药浸膏的干燥是中药制剂生产过程中不可或缺的一个步骤，但其本身具有黏度大、透气性差等特点，导致中药浸膏在普通干燥方式下难以干燥且干燥时间长^[13]。传统的鼓风烘箱干燥和普通真空干燥以及现今常用的冷冻干燥等干燥方式都存在高能耗的缺点，导致在干燥过程中会产生高额净购入电力消耗，进而产生大量碳足迹。

此外，制剂完成后，往往需要对其进行灭菌处理，常规的干热和湿热灭菌方法一般都要保持较高的温度或很长时间才能达到有效的灭菌作用，此过程也会产生相应的碳足迹。

2.2 辅助生产系统

中药制药企业的辅助生产系统即为生产系统配置的工艺过程、设施和设备，包括动力室、空气净化和空调系统、冷库以及制药用水生产过程等。在

原水处理时，离子交换法中阳床与阴床之间的脱气塔会产生一定的 CO_2 ，大量酸碱用于新树脂的预处理与老化后的再生也会产生一定的 CO_2 ，这些过程将会产生直接排放。此外，电渗析法以电为主要动力源，由于电力的消耗会产生相应的碳足迹^[14]。动力室的日常使用当中会涉及到化石燃料的燃烧，将会直接排放大量的 CO_2 ，由此产生的直接碳排放较高，研究表明化石燃料燃烧介入的生产过程会产生更高的碳足迹^[15]。空气净化和空调系统、冷库等使用时将造成高额电力消耗，净购入电力的高额消耗所产生的碳排放是整个生产过程中最为主要的间接排放，将产生大量碳足迹。

2.3 废弃物处置

中药制药企业需要消耗大量的水或乙醇用于洗涤、提取、纯化及蒸煮等过程来完成中药制剂的制造。这将会在制剂过程中产生大量待处理中药制药废水，中药制药企业产生的废水还具有水质复杂、处理难度大等特点，现今中药制药企业常用的废水厌氧处理法和物化法等都会产生 CO_2 、甲烷等温室气体^[16-17]，进而产生相应的碳足迹。各种中药制剂原、辅料的使用也将会造成碳的引入，且中药在经过提取后会留存大量的废渣，中药废渣无论是通过填埋处理、生物氧化还是综合利用都将产生相应温室气体排放，最终产生相应的碳足迹。

2.4 其他

中药制药生产过程中所使用的中药材一般都需

要经过炮制后才能够投入使用,其中炒、炙、煨、炮等火制法或水火共制法等炮制方法都会对药材进行不同程度的加热,加热过程中会消耗相应的电力和蒸汽能源。在制剂、灭菌等完成后,需要对药品进行包装,包装过程中会消耗电力能源,且包装材料的引入会引入额外的碳源。此外,在厂区的车辆流通和原辅料运输过程中会消耗汽油等化石燃料,由此产生的直接排放也应当包含在中药制药企业生产碳足迹评价生命周期之内。

3 碳足迹核算方法的建立

在“双碳”目标确立的背景之下,应通过有效的碳足迹核算研究,对中药制剂生产过程中产生的碳足迹进行定量分析,并基于此进行相应的减排建议。因此,本文参照《2006 国家温室气体排放清单》^[6,18]和《省级温室气体清单编制指南》(试行)^[19]以及生命周期评价方法提出以下碳足迹核算方法。

3.1 确定核算边界

不同的药品,生产模式不尽相同,要根据实际情况绘制药品生产过程图,确定并报告所有温室气体的排放边界。对于系统边界内,碳排放不足 1%的部分需要舍弃,但是该部分所占的比例不得超过总排放量的 5%^[4],要在适应研究目的的情况下,尽可能地涵盖药品生命周期内的温室气体排放核算界限。

3.2 识别温室气体排放源和气体种类

确定药品生产过程中的温室气体排放源头和气体种类,主要的源头包括化石燃料的燃烧、药品生产过程含碳原材料引入、净购入使用的电力和热力产生的排放、废水和废渣处理。气体种类根据实际生产情况,不同的原料可能产生不同的温室气体,主要包括化 CO₂ 和甲烷。

3.3 收集活动水平数据

对于初级活动水平数据,是针对某一具体药品生产需要通过中药制药企业采购记录和台账来获

取,要分别按部门和主要设备从企业收集对应的能源活动水平数据。初级活动水平数据是指可以直接由制药企业或组织内部测得或记录的资源、能源等消耗量。此外,还有次级活动水平数据,指针对某一类药品生产或活动过程,因无法获取初级活动水平数据或获取的数据精度存在问题时,从相应的数据库、专业文献等获取的一类同用或平均测量数据。

3.4 选择和获取排放因子数据

在中药制药企业具有条件的情况下,排放因子可以由专业机构进行独立的评测。一般情况下直接选取由指南提供的排放因子,电力和热力的排放因子可以直接参照《省级温室气体清单编制指南》中的推荐值。一般由于地区的不同,排放因子也相应有所差异。如华北地区火电比例较高,而南方地区水电比例较高,导致南方地区电力的清洁度明显较高,不同地区电力清洁度的差异最终导致每个区域电网的 CO₂ 排放因子存在差异^[20],最后会导致制药过程中净购入电力所产生的碳足迹情况不同。我国目前最新大陆区域电网单位供电平均 CO₂ 排放因子见表 2。

3.5 计算和汇总温室气体排放量

分别计算在药品生产过程中化石燃料燃烧排放、生产过程排放、废水厌氧处理排放、净购入使用的电力和热力产生的排放;最后汇总计算企业温室气体排放总量。

3.6 确定关键排放环节并提出减排措施

最后,需要根据最终的核算结果,确定制药企业的关键碳排放环节,对于高能耗、排放量大的环节要采取针对性的措施以降低能耗和排放。

4 以中药饮片和口服液生产为例的碳足迹核算示例

由于中药制剂剂型众多,而各种剂型的生产模式各不相同,对于单一产品的计算难具普适性又难一次性囊括所有类型中药制剂的碳足迹研究。本文选取药材饮片生产以及具有代表性的中药口服液生产为

表 2 中国大陆区域电网平均 CO₂ 排放因子

Table 2 Average CO₂ emission factors for regional power grids in Chinese mainland

电网名称	覆盖地区	CO ₂ 排放因子/(kg·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
华北区域	北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、内蒙古	0.884 3
东北区域	辽宁省、吉林省、黑龙江省	0.776 9
华东区域	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省	0.703 5
华中区域	河南省、湖北省、湖南省、江西省、四川省、重庆市	0.525 7
西北区域	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏、新疆	0.667 1
南方区域	广东省、广西、云南省、贵州省、海南省	0.527 1

例, 以上述碳足迹核算方法研究二者在生产过程中的碳足迹, 并为中药制药企业的碳足迹研究提供参考。

4.1 根类中药饮片生产过程中的碳足迹研究

根类中药材作为一种常用的中药类型, 也是中药制剂生产过程中常用的一个原料品种, 在使用前一般会将其加工成饮片, 而在这个过程中会产生相应的碳足迹。该加工方法包括采挖鲜药材、除去杂质和非药用部分, 水洗后烘干至一定水分, 切片, 干燥^[21]。中药根类饮片的一体化生产流程见图 3。

根据实际情况对系统边界作出相应划分。本研究将该饮片生产车间、辅助生产系统(仓库和配电

室等)以及运输车辆等确定为研究对象的系统边界, 可以确定生产过程中的碳排放范围。整个生产系统碳的来源主要包括 2 个部分即鲜药材与动力介质。直接碳排放主要包括生产过程中内部车辆转运流通燃油耗费、应急发电机燃油排放。间接碳排放主要包括由于仓储以及生产过程中所使用的电力和热力产生的排放、产品和原材料运输途中的碳排放以及废水处理产生的碳排放。其中排放气体主要类别为 CO₂, 还包括废弃物处置中产生的部分甲烷, 温室气体排放总量为以上直接排放和间接排放的总和。根据其排放范围和碳源头绘制其系统边界, 见图 4。

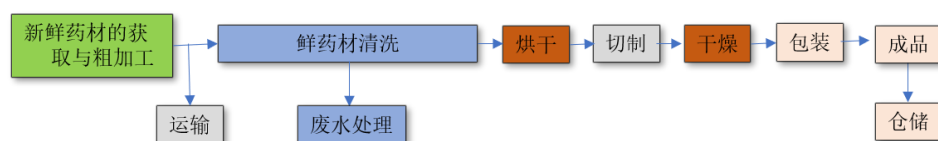


图 3 中药饮片生产流程图

Fig. 3 Flow chart for the production of Chinese medicinal tablets

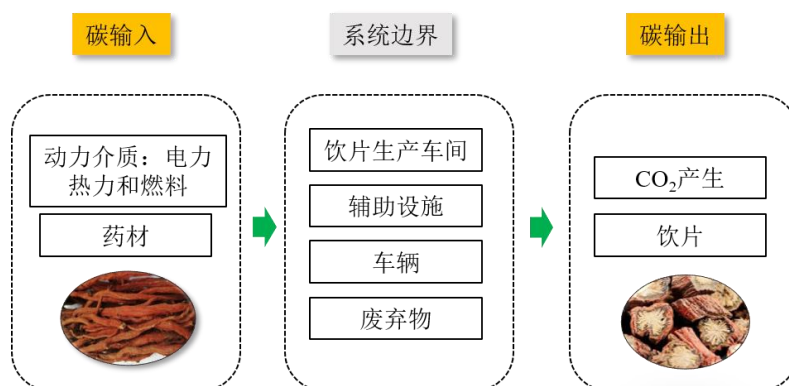


图 4 中药饮片的生产系统边界

Fig. 4 Boundary of production system for Chinese medicinal tablets

依照《2006 国家温室气体排放清单》和《省级温室气体清单编制指南》(试行), 统计该饮片生产系统边界中所涉及到的电力、热力和燃料的活动水平数据和相应排放因子, 代入公式 (2)。

$$E_{GHG} = AD_i \times EF_i \quad (2)$$

式 (2) 中 E_{GHG} 为相应生产过程产生的温室气体排放; AD_i 为生产过程中净购入的电力、热力和生产过程中的燃油活动水平数据, 单位分别为 MW·h、百万 kJ 和万 t; EF_i 为相应电力、热力和生产过程中的燃油排放因子, 单位分别为 kg(CO₂)/(kW·h)、t(CO₂)/百万 kJ 和 t(CO₂)/万 t。根据边界系统确定其产生碳足迹的主要活动包括原料药材与饮片运输时

车辆燃油产生碳排放, 药材和饮片干燥及切制时净购入电力、热力产生的碳排放, 辅助应急发电机化石燃料燃烧产生的碳排放, 废水、废渣处理等, 将其汇总得到公式 (3)。

$$E_{GHG总} = E_{GHG-车辆} + E_{CO_2-净电} + E_{CO_2-净热} + E_{GHG-燃油} + E_{GHG-废弃物} \quad (3)$$

其中, $E_{GHG总}$ 代表饮片一体化生产系统边界内的总温室气体排放量, 以 CO₂ 记; $E_{GHG-车辆}$ 代表生产过程中车辆运输所产生的温室气体量, 以 CO₂ 记; $E_{CO_2-净电}$ 代表生产过程中净购电力产生的 CO₂ 排放量; $E_{CO_2-净热}$ 代表生产过程中净购热力产生的 CO₂ 排放量; $E_{GHG-废弃物}$ 代表由废水、废渣处理产生的温室气体排放量, 以 CO₂ 记。 $E_{GHG-燃油}$ 代表生产过程中应

急发电机等辅助生产设施产生的温室气体排放量，以 CO₂ 记。

4.2 中药口服液生产过程中的碳足迹研究

中药口服液是中药液体药剂的典型代表。其生产工艺程序较多，相较于饮片的生产更加繁复，且涉及到提取和纯化等工艺将会引入有机和无机的试剂进而产生更多废弃物及更高能耗。根据中药口服液生产工艺绘制其生产流程图，如图 5 所示。

根据生产流程，将中药口服液生产车间和辅助生产系统（原辅料仓库、配电室、动力室等）作为

系统边界。整个生产系统碳的来源主要包括药材饮片、动力介质及有机提取溶剂等。直接碳排放主要包括生产过程中内部车辆转流通燃油耗费、应急发电机燃油排放。间接碳排放主要包括生产线、洁净室以及仓储等所需的电力和热力产生的排放，产品和原材料运输途中的碳排放，生产后产生的废水、药渣处理产生的排放。其中排放气体主要类别为 CO₂，还包括废弃物处置中部分甲烷的产生，温室气体排放总量为以上直接排放和间接排放的总和。根据其排放范围和碳源头绘制其系统边界，见图 6。

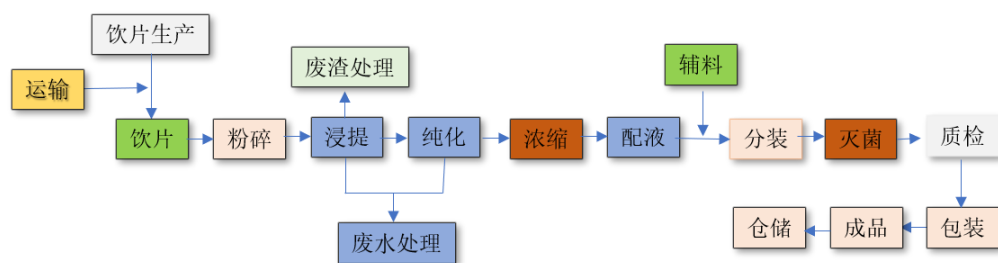


图 5 中药口服液生产流程图

Fig. 5 Flow chart for production of Chinese herbal oral liquid

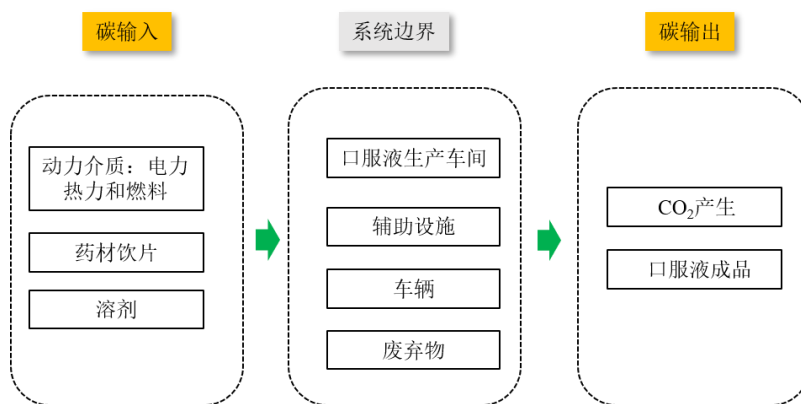


图 6 中药口服液生产系统边界

Fig. 6 Boundary of Chinese herbal oral liquid production system

同中药饮片碳足迹核算方式相同，根据边界系统确定中药口服液产生碳足迹的主要活动包括辅助生产系统中如动力室直接消耗化石燃料燃烧产生的碳排放，浸提、浓缩、灭菌和分装等生产过程以及从仓储过程耗费的净购入电力与热力所产生的碳排放，废水、废渣处理排放，原、辅料和产品运输过程车辆产生的排放等。最后统计整个中药口服液生产系统中涉及的电力、热力和燃料的活动水平数据和相应排放因子，代入公式（2），得到公式（4）。

$$EGHG_{\text{总}} = EGHG_{\text{车辆}} + E_{\text{CO}_2, \text{净电}} + E_{\text{CO}_2, \text{净热}} + EGHG_{\text{燃油}} + EGHG_{\text{废弃物}} \quad (4)$$

根据最后的温室气体排放汇总式来看，在中药饮片和中药口服液生产过程中产生碳足迹的途径是大同小异的。但是，实际生产过程中，对于中药口服液的生产相较于饮片生产必然更加精细化，在这个过程中也会产生更多的碳足迹。如在生产过程中，2 个生产系统对于洁净室的等级要求不同，更高的洁净室等级对于净购入电力的消耗量相对增大，由此产生的碳排放量也会相应的增高。此外，口服液生产过程中涉及了浸提、纯化、灌装、灭菌等工艺，在这些过程中可能会引入相应的有机试剂，这将会

使浸提、纯化以及配液等过程中造成的废水排放处理难度加大、碳排放量增加。最后,相较于中药饮片的生产,口服液还要考虑提取后大量的中药废渣处理,这将会产生额外的碳排放。

5 节能减排建议

在实际碳足迹核算过程中应依据最终的计算结果,确定关键的排放环节,分析减少碳足迹的有效途径,提出减排建议并采取必要的措施,降低关键排放环节如浓缩、烘干、废水处理等过程的碳排放。

首先,中药制药企业应树立并强化节能减排、可持续发展的理念。其次,中药制药企业需要加强绿色低碳制药技术与装备的研究和应用,不断对药品生产技术进行更新,达到低耗能高效率的目的^[22]。如在中药制剂生产过程中常见的干燥工艺,涉及了高额净购入电力的消耗;在不影响药效的情况下,可考虑采用微波干燥、热泵干燥等高效方式替代传统干燥方式。同时,对于一些制药设备运行产生的具有回收价值的余热应当加以回收利用,如在蒸发过程中对产生的二次蒸汽进行利用且尽量避免多效蒸发器中热量的损耗。此外,中药制剂工业化生产过程中会产生大量药渣,这些药渣由于缺乏有效利用途径而废弃,不仅造成资源的严重浪费,还加剧了生态环境压力。因此,中药制药企业应基于多层次资源化模式,实现对药渣的资源化利用,有效降低其碳足迹并实现一定的经济效应^[23]。最后,近年来随着碳汇技术的逐渐成熟,在未来中药制药企业也可通过碳捕集与封存技术(carbon capture and storage, CCS)及碳捕集、利用和封存技术(carbon capture, utilization and storage, CCUS)^[24]等技术固碳方式来降低自身碳足迹。此外,充分发挥中药生态农业的生态固碳作用,降低中药材生产过程的碳足迹,实现产业链的整体碳减排^[25]。

6 结语与展望

基于“3060 双碳目标”和中药制药企业碳排放的问题,本文结合现有碳足迹核算研究,初步提出了中药制药行业的碳足迹核算方法和概念,希望通过碳足迹的核算帮助中药制药企业高效准确地降低其生产运行过程中产生的碳排放。但目前该方法尚未代入实际的药品生产进行核算,缺乏对于实际活动水平数据和相关排放因子的选择以及获取,需要在以后具体研究中进行方法验证。

目前,对于碳足迹的概念多由灰色文件提出,众多学者对于碳足迹的概念尚不一致,还需要相关

权威气候研究组织提出相对的标准使碳足迹概念达到统一。现阶段几种常见的碳足迹核算方法优势和劣势都较为明显,能否找到一种优势更为明显的核算方法将成为未来重要的突破口,混合生命周期评价方法能够同时兼顾宏观和微观层次,是近年来对于碳足迹核算方法的重要进展,但该方法对于数据的精确度和技术的成熟度有较高的要求。

整个中药制药行业对碳足迹研究还处于空白,缺乏相应的专业方法和标准,无论是对中药制药行业碳足迹理论方法还是实际应用方面的研究都还有待加强。对于后续中药制药行业碳足迹的研究,重点应在于制定关于中药制药行业碳足迹研究的专业规范和建立相应的数据库,提高数据收集的精度和速度,降低碳足迹核算误差。再将其用于实际的药品生产过程进行碳足迹核算,并在此过程中不断的完善标准和方法。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- [2] Wackernagel M, Rees W. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth* [M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 6-9.
- [3] 杨传明. 碳足迹研究综述与展望 [J]. 管理现代化, 2015, 35(3): 127-129.
- [4] 马倩倩, 卢宝荣, 张清文. 基于生命周期评价 (LCA) 的纸产品碳足迹评价方法 [J]. 中国造纸, 2012, 31(9): 57-62.
- [5] 周新军, 满朝翰. 全生命周期碳排放核算方法及其应用 [J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2019, 9(4): 10-14.
- [6] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [7] 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.
- [8] 郭恰, 马艳. 基于质量平衡法的污泥处理处置工艺碳减排量核算分析 [J]. 净水技术, 2019, 38(10): 107-111.
- [9] 胡培昊, 乔春珍, 苑翔, 等. 工业化建筑与传统建筑碳排放核算方法研究现状 [J]. 建筑节能, 2018, 46(12): 137-140.
- [10] 黄迪菲. 中药制药工艺优化与发展 [J]. 当代化工研究, 2022(12): 137-139.
- [11] 杨明, 伍振峰, 王芳, 等. 中药制药实现绿色、智能制造的策略与建议 [J]. 中国医药工业杂志, 2016, 47(9): 1205-1210.
- [12] 殷明阳, 刘素香, 张铁军, 等. 复方中药提取工艺研究

- 概况 [J]. 中草药, 2015, 46(21): 3279-3283.
- [13] 詹娟娟, 伍振峰, 尚悦, 等. 中药浸膏干燥工艺现状及存在的问题分析 [J]. 中草药, 2017, 48(12): 2365-2370.
- [14] 闫立成. 制药用纯化水的制备与灭菌方法探讨 [J]. 化工管理, 2014(21): 152.
- [15] POST. Carbon footprint of electricity generation [R]. London: Parliamentary Office of Science and Technology, 2006.
- [16] 焦军强. 甘肃某中药企业制药废水处理工程实践 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [17] 张梅梅, 陈洁, 王嘉雯, 等. 中药废水处理技术研究进展 [J]. 当代化工, 2021, 50(5): 1249-1252.
- [18] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读 [J]. 环境工程, 2019, 37(8): 1-11.
- [19] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南 (试行) [EB/OL]. (2013-08-23) [2015-11-30]. <http://www.doc88.com/p-5901641912661.html>.
- [20] 付坤, 齐绍洲. 中国省级电力碳排放责任核算方法及应用 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(4): 27-34.
- [21] 郭振宇, 张毅, 张正锋, 等. 星点设计-响应面法优化川党参产地加工炮制一体化工艺研究 [J]. 中药新药与临床药理, 2019, 30(11): 1385-1390.
- [22] 蔡万裕. 制药企业节能减排与可持续发展战略的思考 [J]. 中国卫生产业, 2013, 10(6): 184-185.
- [23] 段金彪, 宿树兰, 郭盛, 等. 中药资源产业化过程废弃物的产生及其利用策略与资源化模式 [J]. 中草药, 2013, 44(20): 2787-2797.
- [24] 赵震宇, 姚舜, 王小龙, 等. “双碳”目标下: 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议 [J/OL]. 环境科学, [2022-06-23]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202203136>.
- [25] 袁盼, 申俊龙, 申远. 基于生态效应的中药废弃物资源化的模式与技术选择 [J]. 中草药, 2015, 46(19): 2829-2833.

[责任编辑 崔艳丽]