



化工进展  
Chemical Industry and Engineering Progress  
ISSN 1000-6613, CN 11-1954/TQ

## 《化工进展》网络首发论文

题目： 生命周期评价方法在医药领域的应用现状与研究进展  
作者： 李晶莹，马龙飞，张红娟，潘一搏，卢山，徐龙，马晓迅  
DOI： 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2048  
收稿日期： 2023-11-23  
网络首发日期： 2024-01-03  
引用格式： 李晶莹，马龙飞，张红娟，潘一搏，卢山，徐龙，马晓迅. 生命周期评价方法在医药领域的应用现状与研究进展[J/OL]. 化工进展.  
<https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2048>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 文章类型：综述与专论

DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2048

# 生命周期评价方法在医药领域的应用现状与研究进展

李晶莹<sup>1,2</sup>, 马龙飞<sup>1</sup>, 张红娟<sup>1</sup>, 潘一搏<sup>1</sup>, 卢山<sup>1</sup>, 徐龙<sup>1,2</sup>, 马晓迅<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>西北大学化工学院, 陕西 西安 710069; <sup>2</sup>碳氢资源清洁利用国际科技合作基地, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 方法可以系统识别和评估不同产品与工艺之间的环境问题, 确定污染物排放量并最大限度地减少产品和工艺过程中的环境影响。相比于基础大宗化工产品, 医药化学品及中间体通常比较复杂, 所带来的环境影响更大, 通过生命周期评价可以量化分析医药领域中产品全生命周期过程造成的潜在环境影响, 以支持医药领域“双碳”目标发展。本文简述了生命周期评价方法的四个步骤: 目的和范围的确定, 生命周期清单分析, 生命周期影响评价和生命周期解释。并在此基础上, 从药物生产、医疗器械、医疗服务三方面综述了生命周期评价在医药领域的应用现状和研究进展, 指出了现有的医药生命周期评价研究所存在的一些问题, 如研究相对较少, 数据收集困难, 尤其是药物中间体结构复杂、生命周期上游清单数据缺失, 以及数据质量不高、生命周期影响评价方法不统一等问题。最后, 针对未来医药领域生命周期评价发展提出相关建议。

**关键词:** 医药领域; 生命周期评价; 温室效应; 药物生产; 医疗器械

中图分类号: TQ460.1

文献标志码: A

## Current status and research progress of life cycle assessment method in pharmaceutical field

LI Jingying<sup>1,2</sup>, MA Longfei<sup>1</sup>, ZHANG Hongjuan<sup>1</sup>, PAN Yibo<sup>1</sup>, LU Shan<sup>1</sup>, XU Long<sup>1,2</sup>, MA Xiaoxun<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; <sup>2</sup>International Science and Technology Cooperation Base for Clean Utilization of Hydrocarbon Resources, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

**Abstract:** The life cycle assessment (LCA) methodology is widely used for the systematic identification and assessment of environmental issues among different products and processes, especially for identifying pollutant emissions and minimizing the environmental impacts of products and processes. Pharmaceutical chemicals and intermediates are usually more complex and result in greater environmental impacts than basic bulk chemicals. Therefore, LCA can systematically quantify and analyze the potential environmental impacts of the entire life cycle of products in the pharmaceutical field to support the "dual-carbon" goal of China. This paper briefly describes the four steps of the LCA methodology, including goal and scope

收稿日期: 2023-11-23; 修改稿日期: 2023-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金 (22008198); 陕西省科协青年人才托举计划 (20220602); 陕西省教育厅高校青年创新团队科研项目 (22JP090); 陕西省博士后科研项目 (2023BSHEDZZ231)。

第一作者: 李晶莹, (1990—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为生命周期可持续性评价与多目标集成优化。

E-mail: lijingying99@nwu.edu.cn。

通信作者: 马晓迅, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为化学工程、能源化工、工业催化。E-mail:

maxym@nwu.edu.cn。

definition, life cycle inventory, life cycle impact assessment, and life cycle interpretation. On this basis, the current status and research progress of the application of LCA in the pharmaceutical field is specified from the aspects of drug production, medical devices, and medical services. Additionally, the crucial existing problems in the pharmaceutical LCA studies are identified, such as relatively rare studies, difficult in the data collection, especially for drug intermediates which usually have complex structures, lack of the life cycle upstream data, the low accuracy of the data, and inconsistency in the LCA methodology. Finally, relevant suggestions are proposed to support the sustainable development of the pharmaceutical field from the life cycle perspective.

**Keywords:** pharmaceuticals; life cycle assessment (LCA); global warming potential (GWP); pharmaceutical production; medical devices

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价<sup>[1]</sup>。随着全球对环境问题的重视, 生命周期评价方法作为一种决策工具, 已经广泛运用于各行各业的环境管理和战略规划等方面, 包括: 1) 工业、企业层面, 对产品和工艺在不同生命周期阶段的环境影响进行定性和定量分析, 寻找合理经济绿色的设计方案、实施方法和改进措施; 2) 政府、非政府组织层面, 在废物管理、清洁生产审核、绿色制造与管理、生态产品认证等方面提供决策依据和指导; 3) 环境影响评价考核层面, 包括测量与评价技术、产品环境标志的评价等<sup>[2]</sup>。

医药产品是促进全球社会可持续发展不可或缺的要素, 对提高人类生活质量和社会经济发展做出了巨大的贡献。当前, 医药领域 (药物研发、医疗器械生产等) 背后所产生的环境影响得到社会越来越多的关注。随着我国“双碳”目标的提出, “1+N”双碳政策体系的不断构建和完善, 与医药领域相关的减碳政策也相继出台, 如《推动原料药产业绿色发展的指导意见》、《深入开展公共机构绿色低碳引领行动促进碳达峰实施方案》和《“十四五”医药工业发展规划》等。其中《“十四五”医药工业发展规划》明确指出, 要落实国家“双碳”战略部署, 制定实施医药工业重点领域碳减排行动计划, 明确二氧化碳排放强度控制目标, 提高全行业资源利用效率。而碳排放数据是医药企业识别减排重点、预估减排潜力、制定目标和行动措施的基石, 生命周期评价方法可系统考察医药产品全过程能源消耗及温室气体排放, 从而制定科学的节能减碳应对措施, 实现医药行业绿色设计和清洁生产, 降低气候和环境变化对人类健康的危害。

开展医药领域生命周期环境影响评价是我国医药企业落实国家“双碳”目标的重要工作, 对医药领域低碳高质量发展具有重要意义。随着生命周期评价的大力发展, 生命周期评价方法已成为评价医药产业链中潜在环境影响和促进节能降碳的重要工具。国内外学者将生命周期评价理念和方法引入医药领域, 开展了一系列研究, 也取得了卓有成效的成果。鉴于此, 本文将从药物生产、医疗器械、医疗服务三个方面系统分析生命周期评价方法在医药领域内应用现状和研究进展, 指出现有医药领域生命周期评价应用中存在的问题, 并对未来发展提出相关建议, 以期为医药领域的生命周期可持续发展提供新思路。

## 1、生命周期评价框架

ISO14040《生命周期评价原则与框架》(《Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework》) 标准明确提出生命周期评价方法框架由以下四部分组成: 目的和范围的确定 (Goal and Scope Definition)、生命周期清单分析 (Life Cycle Inventory, LCI)、生命周期影响评价 (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) 与生命周期解释 (Life Cycle Interpretation) <sup>[1]</sup>, 如图 1 所示。

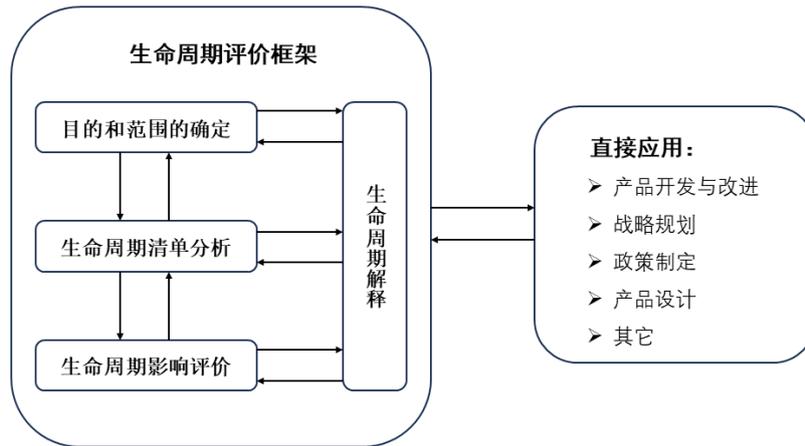


图 1 LCA 技术框架<sup>[1]</sup>

### 1.1 目的和范围的确定

目的和范围的确定是生命周期评价过程的第一步，需要明确评价的目标以及评价范围。内容主要包括确定评价对象、功能单位、系统边界、分配程序、假设和限制条件等。

#### 1) 评价对象

评价对象是明确评价的目标。可以是某个产品、某一过程或某一组织等。如某种药物或药物器械等。

#### 2) 功能单位

功能单位是一个明确定义产品或服务的量化表示，如生产 1kg 阿司匹林原料药。

#### 3) 系统边界

系统边界表示确定评价对象的哪些单元过程在研究范围内，可以是针对评价对象的整个生命周期进行，也可以为某一特定时间段。如“摇篮到坟墓 (cradle to grave)”、“摇篮到大门 (cradle to gate)”、“大门到大门 (gate to gate)”、“大门到坟墓 (gate to grave)”。

#### 4) 分配程序

通常在很多生产系统中，不止生产一种产品，大部分是多产品输出，尤其是药物生产，副产品较多。因此，需要对输入清单数据进行分配，而分配方法的选择对生命周期评价结果有重要影响。ISO14044 中对分配方法的优先顺序给出了相关建议，依次为避免分配法（系统扩展法和细分法）、物理关系分配法（根据质量、能量等）及经济分配法（根据价格、总产值等）<sup>[3]</sup>。

#### 5) 假设和限制条件

目的和范围的确定还需要考虑利益相关者的需求、数据可用性、技术限制等多方面因素，并与相关方共同确定评价内容。

### 1.2 生命周期清单分析

生命周期清单分析是对评价对象在不同生命周期阶段的输入和输出进行系统记录和分析的过程，包括材料流清单（资源开采、物质生产、运输等）、能量流清单（能源使用等）、排放清单（评价对象所产生的排放物）等。清单分析的目的是详细了解评价对象在不同生命周期阶段的物质和能量流动情况，识别关键的环境因素和潜在影响因素，为下一步影响评价做好准备。由于该阶段数据收集工作量大、花费时间长，且往往不易获取，因此数据收集的方法和计算程序需灵活选择。基于方法学原理的不同，清单构建方法可分为基于过程、基于投入产出和混合清单构建方法<sup>[4, 5]</sup>。生命周期清单数据根据数据来源可分为前景数据（Primary data）与背景数据（Background data）两种类型，前景数据一般来源于实地调查、企业报告、现场测量等方式，而背景数据来源于数据库、统计年鉴、文献等。目前，全球已有的数据库主要包括 Ecoinvent 数据库、ELCD 数据库、GaBi 数据库、U.S.LCI 数据库、KCLCD 数据库、IDEA 数据库、CLCD 数据库、CPCD 数据库及 SinoCenter 数据库等，如表 1 所示<sup>[6, 7]</sup>。由于我国数据库还不够完善，各研究单位构建的数据库也很难共享，导致国内的生命周期评价方法研究相对困难<sup>[4]</sup>。

表 1 代表性生命周期清单数据库

| 数据库名称      | 国家 | 简介                                                                                                                                                              |
|------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ecoinvent  | 瑞士 | Ecoinvent 数据库涵盖了欧洲及世界各国 19000 多种产品的单元过程和汇总过程数据集(3.8 版), 包含各种常见物质的 LCA 清单数据, 是国际 LCA 领域使用最广泛的数据库之一, 也是许多机构指定的基础数据库之一。                                            |
| ELCD       | 欧盟 | ELCD 数据库涵盖了欧盟 440 多种大宗能源、原材料、运输的汇总 LCI 数据集, 是欧盟环境总署和成员国政府机构指定的基础数据库之一。                                                                                          |
| GaBi       | 德国 | GaBi 数据库 (2022 年更新后) 包括世界各国和各行业的 17000 个汇总过程数据集, 涵盖了建筑与施工、化学品和材料、消费品等 16 个行业。                                                                                   |
| U.S.LCI    | 美国 | U.S.LCI 数据库包含了 950 多个单元过程数据集及 390 个汇总过程数据集, 涵盖常用的材料生产、能源生产、运输等过程。                                                                                               |
| KCLCD      | 韩国 | KCLCD 数据库包含了 393 个汇总过程数据, 涵盖物质及配件的制造、加工、运输、废物处置等过程。                                                                                                             |
| IDEA       | 日本 | IDEA 数据库包含了 4700 条非制造业、制造业及其他部门的 LCI 数据集, 涵盖了日本标准商品分类范围内的所有产品。                                                                                                  |
| CLCD       | 中国 | CLCD 数据库由亿科环境自主开发, 是目前国内唯一达到自身生命周期完整的基础数据库, 包含数百种大宗能源、原材料、化学品的上千个生产过程数据, 数据均来自中国本国行业统计、相关标准、企业公开报告等。CLCD 数据库发布公开透明的 CLCD 数据库文档, 并将发布可在线追溯的原始模型 <sup>[6]</sup> 。 |
| CPCD       | 中国 | CPCD 为中国产品全生命周期温室气体排放系数库, 涵盖了 1081 条能源产品、工业产品、生活产品、交通服务、废弃物处理和碳汇的数据集。数据集包括产品上游排放、下游排放、排放环节、温室气体占比、不确定性、数据时间、参考文献或数据来源等信息。                                       |
| SinoCenter | 中国 | SinoCenter 数据库由北京工业大学开发, 涵盖了材料生命周期分析基础数据 10 余万条, 包含公用系统, 典型材料 (建筑材料、钢铁、有色金属、高分子材料、联接材料) 等 70 多个我国材料 LCA 数据集产品, 被国内外广泛应用。                                        |

### 1.3 生命周期影响评价

生命周期影响评价是生命周期评价过程中最重要的环节, 该过程对上一环节清单分析所产生的环境影响做出定量或定性的描述或评价。主要包括影响分类、特征化、量化评价等步骤, 即对清单分析得到的数据归分到属性相关的环境影响类型中, 通过特征化因子转化为统一单位的环境影响类型, 再将环境影响类型的计算结果与选定的基准值比较, 得到归一化结果, 最后进行加权处理得到总体环境影响。目前, 生命周期影响评价方法根据评价目的包括中点法 (以污染物当量表征) 和终点法 (以损害评估表征) 两种类型, 常见的中点法如 EDIP<sup>[8]</sup>、CML2001<sup>[8]</sup>、EPS<sup>[9]</sup>、LUCAS<sup>[10]</sup>、TRACI<sup>[11]</sup>等, 终点法如 Eco-indicator 99<sup>[12]</sup>、IMPACT2002+<sup>[13]</sup>、ReCiPe<sup>[14]</sup>等。我国也建立了适合中国产品生命周期影响评价方法 LCIA-Y<sup>[15]</sup>以及节能减排综合评价方法 ECER<sup>[16]</sup>等。

### 1.4 生命周期解释

生命周期解释是对所建立的清单分析和生命周期影响结果进行总结、归纳的环节, 该阶段主要包含 3 个要素: 识别、评估和报告。识别是发现评价对象的薄弱环节和潜在环境影响; 评估是对整个生命周期评价过程所涉及的数据、信息等进行完整性、敏感性和一致性讨论与分析; 报告是将生命周期评价不同阶段所做的研究结果分别作出说明, 解释研究中的数据、方法、假设以及局限性, 并给出相关建议<sup>[17]</sup>。

## 2 医药领域内生命周期方法研究

生命周期评价在医药领域应用主要概括为药物生产、医疗器械、医疗服务三个方面。

## 2.1 生命周期评价方法在药物生产中的应用

目前，世界制药工业分为化学制药（包括化学原料药和化学制剂）、生物制药和传统制药（以植物药为主）三大类别。尤其是以化学制药为主。然而，化学制药厂排出的污染物通常具有毒性、刺激性和腐蚀性，往往防治比较困难。因此，绿色化学和可持续发展已成为制药行业重中之重。生命周期评价方法作为一种系统的环境评价管理工具，在药物生产领域得到了广泛应用。

**(1) 制药行业 LCA 理论方法相关研究。**在 2016 年左右，制药行业使用一些不同的绿色指标来量化不同生产阶段的环境效应，如 E 因子，工艺质量强度 (PMI) 以及绿色期望水平指标 (Green Aspiration Level, GAL) 等，然而，这些指标是基于质量来量化分析的，缺乏对热量、能源等因素的考虑；2018 年，Siegert 等<sup>[18]</sup>基于生命周期评价理论，提出可根据不同药理功能比较原料药的生命周期环境影响或根据不同制剂处方、不同区域制药企业、不同医药包装等指导未来对药品和工艺的生命周期评价研究，并根据药品的生命周期历程可把制药行业生命周期边界划分为以下四个层面：“摇篮-原料药生产”、“摇篮-制剂生产”、“摇篮-制剂包装”及“摇篮-坟墓”，如图 2 所示，该项研究极大促进药品全生命周期协同发展；2021 年，Roschangar 等<sup>[19]</sup>结合生命周期评价方法开发了新绿色期望水平指标 (iGAL 2.0)，更好地拓展了基于质量的环境量化指标 (PMI、E 因子等)，并与现有过程进行比较分析，结果用相对绿色过程指数 (RPG) 表示，可以量化分析原料药整个生产工艺中所产生的废物种类及数量，从而减少原料药制备工艺中材料与能源损失，以支持绿色生态设计和质量效率更高的药物生产工艺，实现可持续发展目标。

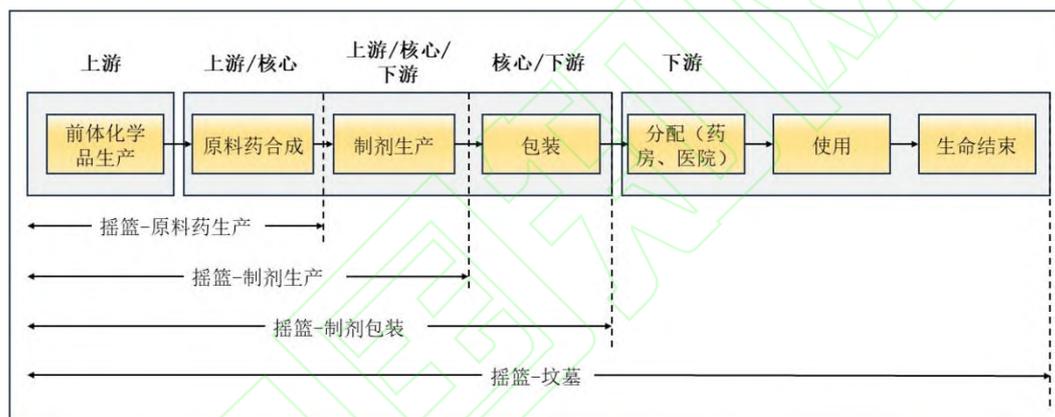


图 2 药品的通用生命周期<sup>[18]</sup>

**(2) 前体化学品及原料药合成过程所用溶剂的 LCA 研究。**药物生产中使用的溶剂是影响环境的重要因素之一，很多学者对其从生命周期视角进行了评价研究。Raymond 等<sup>[20]</sup>采用 SimaPro 7.1 软件对药物常见溶剂（丙酮、乙腈、乙醚、乙醇、己烷等）进行生命周期分析，结果表明溶剂的生产过程和废弃处置过程对环境有重要影响，通过对废弃溶剂回收，可有效减少生产过程的能源消耗和环境污染。Ott 等<sup>[21]</sup>对抗癫痫药物卢非酰胺工业生产路线和实验室合成路线进行生命周期评价研究，发现叠氮化物形成过程对卢非酰胺整个生产过程环境影响贡献最大，通过分析改进路径、实施溶剂回收方法及从多步批处理切换到多步流处理后，各阶段电力对环境的影响平均降低了 45%；Kong 等<sup>[22]</sup>对抗真菌药物恩诺沙星进行“摇篮-大门”的生命周期评价研究，并从溶剂替换（乙醇溶剂替换异戊醇溶剂）、能源调整（液化天然气取代燃煤发电）和协同分析（溶剂替换与能源调整同时结合）三种方案进行优化，指出协同分析方案最优，为药品生产工艺优化提供了重要参考。杨珂宣<sup>[23]</sup>对两种盐酸环丙沙星生产工艺采用溶剂替换、能源调整以及协同分析三种方案进行生命周期评价优化研究，结果表明，三种方案均可有效改善环境，其中协同分析对环境的影响最小，其次为溶剂替换，采用乙醇溶剂替换异戊醇溶剂效果显著。Alviz 等<sup>[24]</sup>考察了乙酰水杨酸中挥发性有机溶剂（甲苯）替代 [Bmim]Br 离子液体，结果表明，甲苯产生的环境影响明显低于 [Bmim]Br 离子液体，可通过提高离子液体的溶剂使用效率和回收率或替代毒性更小的阴离子基团，以降低离子液体在乙酰水杨酸生产中的环境毒性。

**(3) 药物制剂生产方面的 LCA 研究。**Hadinoto 等<sup>[25]</sup>对布洛芬片剂生产中所使用的润滑剂（滑石粉、硬脂酸镁、聚乙二醇 6000 和十二烷基硫酸钠）采用 ReCiPe 中点法进行生命周期分析，结果表明，聚乙二

醇 6000 环境影响最小,硬脂酸镁和十二烷基硫酸钠对环境的影响最大,主要贡献物质分别为氢氧化钠和十二醇。Sharma 等<sup>[26]</sup>采用生命周期评价方法分析了扑热息痛片剂和糖浆剂两种剂型对环境的影响,结果表明,片剂生产对人体毒性产生重大影响,同时片剂生产过程中泡罩包装是环境主要贡献者之一,糖浆剂生产对气候变化影响类别贡献达 90%。在选择更多的中点和终点环境影响类型下,相比于扑热息痛片剂,糖浆剂具有更高的环境影响。

(4) **药品包装方面的 LCA 研究。**Bassani 等<sup>[27]</sup>基于生命周期评价方法设计绿色药品包装,并从以下三种策略入手:1)减小包装体积和重量,2)替代包装材料,3)减少运输距离。结果表明,三种方案均可减少全球变暖影响,但会增加其他环境类别的影响,如一些替代材料(生物材料)看起来“环保”,但可能会在上游生产过程产生更高的影响;或在特定生命周期阶段有所改善,但在整个生命周期中显著增加(负担转移)。因此,可综合考虑以上因素设计绿色生态药品包装<sup>[28]</sup>。

(5) **药品“摇篮-坟墓”的 LCA 研究。**大部分药物 LCA 研究侧重于“摇篮到制剂”,Siegert 等<sup>[29]</sup>对布洛芬药进行了“摇篮-坟墓”完整生命周期评价研究,结果表明,原料药生产、制剂生产和包装阶段对环境的影响最大,同时销售阶段产生的一些纸张印刷等对环境污染较大,而对于布洛芬生命周期结束阶段,即经过污水处理厂之后原料药排放对环境的影响很小。

(6) **生物制药方面的 LCA 研究。**如今,生物制药快速发展,对生态环境的污染也不容忽视,通过生命周期评价方法可以更全面的了解生物制剂对环境的影响,从而制定有效的措施<sup>[30]</sup>。Renteria 等<sup>[31]</sup>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,结果表明暖通空调在非生产时间和非生产区域的运行所消耗的电力对环境的影响较大,其次为电力在生物制剂填充阶段和理瓶阶段的消耗。因此,制药企业要实现可持续发展,需严格实行生产管理规范,减少不必要的资源、能源浪费。

(7) **中药废渣相关的 LCA 研究。**中药制备时往往会产生大量的中药废渣,如果处理不妥,将会对水质、土壤和空气造成很大的危害。尹阳阳<sup>[32]</sup>对中药渣处理方式(气化、填埋)进行生命周期分析,指出中药渣气化系统环境效益明显优于填埋系统。Liu 等<sup>[33]</sup>采用生命周期评价考察了以秸秆为原料的生物质制甲醇,并与中药渣和煤制甲醇进行对比,结果表明,在相同生产能力下,中药渣制甲醇工艺相比于比煤工艺生命周期能耗和温室气体排放大幅度降低。刘梦佳等<sup>[34]</sup>在此基础上验证了以中药渣为主的生物质制甲醇工艺在生命周期能耗和温室气体排放方面的优势,并提出可根据药渣种类、生产背景、产业特点、环境压力等情况,科学合理的进行药渣资源化利用。

以上从药物生产 LCA 理论方法发展、药物溶剂、药品包装、具体药物产品、生物制药、中药药渣处理多个角度综述了国内外学者针对药物生产方面开展的生命周期评价研究。可以看出,大多数研究生命周期研究边界为“摇篮-大门”,即原料输入-制剂生产,优化方向主要包括溶剂替换、能源调整和协同分析;制剂生产所用的一些药用辅料对环境及人类健康的影响较大;在药品包装方面,采用 LCA 方法可极大促进药品包装的生态环保性。可见,在药物生产方面,生命周期评价方法对药物绿色设计、药品生产工艺对比、全过程改进、废弃物综合利用、绿色包装具有重要的指导意义。

## 2.2 生命周期评价方法在医疗器械中的应用

医疗器械是重要的健康辅助器械,涵盖了各种各样的产品,从简单的结扎器到起搏器,再到骨移植植物或辅助生命维持机等<sup>[35]</sup>,尽管它们可以提高和延长患者的生命,但背后所存在的环境问题却不容忽视。2011 年, Yamanoor 等<sup>[36]</sup>提出将生命周期评价方法应用在医疗器械方面,根据影响评价结果在医疗器械的采购、生产、运输和处置阶段,设计出更合理、经济的方案,更全面的实施方法和改进措施,得到更加绿色环保的产品。2015 年, Moultrie 等<sup>[37]</sup>调查发现医疗器械对环境的影响大大增加,原因主要为大部分器械生命周期短,尤其是一次性医疗器械,如注射器、棉签、检验试管等,其生产过程中使用的一些增塑剂、材料等会产生有毒物质造成环境污染。表 2 汇总了近年来在医疗器械方面的生命周期评价研究,结果表明,大部分研究多侧重于一次性和可重复医疗器械的环境影响比较,且都发现可重复使用医疗器械相较于一次性医疗器械对环境的影响更低<sup>[38-46]</sup>。因此,在医疗器械设计生产时,保证患者的健康,不被交叉感染的情况下,尽可能设计生产可重复使用医疗器械。然而,由于某些医疗保健用品关键组件的专有设计和材料等往往具有保密性,使数据收集和生命周期评价建模过程比平时变得更加复杂,导致生命周期评价对一些复杂的医疗保健用品研究相对较少<sup>[44]</sup>。

表 2 生命周期评价在医疗器械中的应用研究

| 年份   | 评价目的                      | 功能单位                                                                 | 研究结果                                                                                        | 文献       |
|------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 2015 | 分析废弃温度计中汞的不同处理方式下的环境影响    | 温度计中 1kg 汞废弃物                                                        | 消除露天倾倒废弃温度计中的汞和提高汞的回收率, 可以大幅度减少汞对环境的影响, 并且在进行汞回收时, 减压蒸馏工艺优于手工蒸馏工艺。                          | [38]     |
| 2016 | 分析一家医院七种医疗器械不同程度处理方式的环境影响 | 一家综合医疗外科医院中的七种医疗设备 (深静脉血栓形成压缩套管、脉搏血氧仪、韧带、电脑反馈控制双极切割刀片、腹腔镜套管针、关节镜和剪刀) | 在全球变暖潜值下, 加压套管和韧带对环境的影响最大, 剪刀对环境的影响最小。对于这些器械, 环氧乙烷、电力、和水的优化将进一步降低对环境的影响。                    | [39]     |
| 2017 | 比较计量吸入器和电动雾化器的全球变暖潜值      | 一剂硫酸沙丁胺醇                                                             | 在全球变暖潜值下, 计量吸入器 (0.0972kg CO <sub>2</sub> -eq) 明显高于电动雾化器 (0.0294kg CO <sub>2</sub> -eq)。    | [40]     |
| 2021 | 评价医用口罩生产和消费的环境热点          | 2020 年 (从 2 月 1 日到年底) 在中国生产的医用外科口罩和 N95 口罩的总和                        | 在 COVID-19 病毒发生期间, 医用外科口罩大幅消耗导致聚丙烯消费量剧增, 人类健康、环境质量、气候变化和资源类别的损失加深; 同时, 处理不当的废弃口罩进一步加深了环境危害。 | [41, 42] |
| 2021 | 分析可重复使用电生理导管的环境影响         | 生产一根一次性电生理导管和一根可重复使用电生理导管                                            | 在全球变暖影响下, 可重复使用电生理导管相较于一次性电生理导管可减少 50.4%, 化石资源消耗减少 28.8%。                                   | [43]     |
| 2022 | 分析可重复使用电生理导管的环境排放         | 生产一根一次性电生理导管和一根可重复使用电生理导管 (与上述型号不同)                                  | 可重复使用电生理导管相比于一次性电生理导管可减少 60% 的温室气体排放; 且通过长期生产再循环电生理导管, 总排放减少依然可达 48%。                       | [44]     |
| 2022 | 分析两种不同类型的医用吻合器对环境的影响      | 生产一个旋转头式医用吻合器和一个一次性医用吻合器                                             | 相比于没有加钢的医用吻合器, 加钢的医用吻合器在富营养化、化石资源消耗和生态毒性明显高于另一种吻合器, 且环境影响取决于加入的塑料质量。                        | [45]     |
| 2023 | 对比分析一次性防护服和可重复使用防护服的环境足迹  | 分别生产 1000kg 一次性防护服和可重复使用防护服                                          | 全球变暖效应与陆地生态毒性在生命周期阶段中占主要地位, 且一次性防护服环境各影响类别远大于可重复使用防护服。                                      | [46]     |

### 2.3 生命周期评价方法在医疗服务中的应用

医疗服务涉及对患者进行检查、诊断、治疗、康复和提供预防保健、接生、计划生育等方面的服务多个方面, 且伴随着药品、医用材料器具、救护车、病房等日常消耗, 环境影响也不容忽视。目前, 针对医疗服务中的 LCA 研究主要有以下三个方面:

(1) **检验及手术过程中的 LCA 研究。**据美国卫生部门统计, 2013 年美国在医疗保健服务行业中排放了 10% 的温室气体, 其中很大一部分排放来自手术室<sup>[47]</sup>。Gordon 等<sup>[48]</sup>基于生命周期评价理论探究外科病理学实验室胃肠道活检中的温室气体排放, 研究范围包括对活检实验室内使用的所有样品、材料 (包括防护服、手套、一次性使用和可重复使用工具等)、电力以及实验人员送检的过程等, 结果表明活检使用试剂与收集标本所涉及的一次性物品是温室气体排放的最大贡献者。Thiel 等<sup>[49]</sup>采用混合生命周期评价方法考察了外科手术中子宫切除手术过程中产生的温室气体, 虽然手术过程中腹腔镜和机器人结合使用技术更先进, 但是资源消耗更多, 产生更多的废弃物和温室气体, 该项研究为改善外科手术环境影响提供更多的可能, 以便实施有针对性的碳减排策略。肿瘤学领域里放射治疗通常对环境也有影响, 于是 Lichter 等<sup>[50]</sup>提出将生命周期评价方法应用于评估放射治疗中环境足迹, 由于没有具体数据的支持, 还需进一步验证该方法评估肿瘤领域内环境影响的可行性。Thiel 等<sup>[51]</sup>基于生命周期评价方法开发了一种 Eyefficiency 工具, 可用于捕捉白内障手术过程中产生的固体废物、二氧化碳等数据, 并通过确定最适宜手术室地点, 最大限度减

少白内障手术服务的碳足迹。该工具使临床医生能够监控自己手术中的碳足迹，并为他们提供数据和建议，以支持其手术交付服务的改进。Marco 等<sup>[52]</sup>对血液透析治疗慢性肾病进行生命周期评价研究，结果发现血液透析对全球变暖、水资源消耗和污染产生很大的环境影响，且使用方法、资源管理和到治疗现场的运输过程中都会对造成温室气体排放。

**(2) 手术后护理的 LCA 研究。**Prasad 等<sup>[53]</sup>对美国一家医院病人在普通病房和重症监护病房期间所产生的环境足迹进行生命周期评价研究，经过比较分析两种不同的病房，在分配方法采用根据工作人员分配情况下，重症监护病房每天产生的温室气体明显大于急症监护病房，而对于这两种不同的病房，所产生的温室气体结构类似，其中医疗物品（导尿包、脉搏血氧仪、心电图机、手套、注射器、吸盘和防护服等）占比最大。

**(3) 综合医疗服务的 LCA 研究。**Cimprich 等<sup>[54]</sup>采用生命周期评价方法对加拿大一家医院 2018 年 4 月 1 日—2019 年 3 月 31 日这一年的环境影响进行量化评价，结果表明这一年医院的全球变暖潜值达 3000~5000 t CO<sub>2</sub>-eq，并发现医院环境足迹中的“热点”主要为能源和水的使用（以及产生的废水等）、麻醉气体的释放以及医院使用的数千种材料、化学品、药品和其他产品上游的生产过程，这项分析对推进医院可持续发展及制定相关政策提供科学依据和重要参考。

综上，可见医疗保健服务行业也存在较大的温室气体排放。在处理医疗服务行业可持续医疗问题时，使用生命周期评价方法可获取某一环节的温室气体排放数据，从而采取有效的措施改善环境状况，不断向可持续医疗技术、气候智能医疗、循环医疗技术和数字健康发展。

### 3 生命周期评价方法在医药领域内存在的问题

通过对国内外医药行业生命周期评价研究文献的系统梳理和深入剖析发现，目前医药领域生命周期评价研究取得了一定成果，但尚处于起步阶段，还存在一定的不足。目前，生命周期评价方法在医药领域研究主要存在以下问题：LCA 研究相对较少、医药数据收集困难、数据质量不高、生命周期影响评价方法不统一等问题。

**(1) 医药领域 LCA 研究相对较少。**相比于化工大宗产品、电力、钢铁、能源等行业<sup>[16]</sup>，目前在医药生命周期评价方面的研究仍相对较少。已发表的药品生产 LCA 研究大部分从试剂替换、能源调整等方面进行分析，缺乏针对一个药品全生命周期过程的系统分析与评价。此外，在医疗器械和医疗服务方面，多侧重于一次性和可重复性医疗产品生命周期结束阶段研究，缺乏对医疗产品及其技术全过程的系统评价与量化分析<sup>[39]</sup>。

**(2) 医药数据收集困难。**缺乏药物生产数据一直是生命周期评价方法在分析医药领域内环境可持续性时面临的主要障碍之一。首先，药物本身涉及很多医药中间体，且生产工艺复杂，产业链长，体系复杂，导致生命周期数据繁多，清单上游支撑十分有限；其次，由于大多数药品、医疗器械等研发工艺受专利保护，其生命周期清单数据往往不易获取，如新药研发阶段会产生多种药物中间体，关键合成步骤所用的化学试剂及反应条件等通常以“黑盒”的形式呈现在大众面前。因此，针对药物清单收集过程中缺失的数据，许多研究者提出了相应的应对方案。Ott 等<sup>[55]</sup>提出采用逆合成分析方法补充缺失的 LCI 数据。Huber 等<sup>[56]</sup>开发了一种 RREM（Research, Reaction, Energy, and Modeling）模型，可填补缺失的化学品数据集，如图 3 所示，该模型主要包括以下步骤：a) 化学物质及其合成工艺研究，b) 建立反应方程并与现有数据库核对数据的可用性，c) 热能需求研究，d) 对数据集进行建模并连接到现有数据集，并汇总了 60 种化学品用于建模的数据资料，进一步为化学合成过程中数据收集提供参考。Parvatker 等<sup>[57]</sup>为了得到 20 种常用麻醉注射药物 LCI 数据，从专利和其他公开文献中找寻到合成方法，再整合成具体的实验方案，利用实验所得数据和化工工艺计算得到的数据进行 LCI 建模。然而，尽管开发了一些补充收集数据的方法，但由于化学合成过程通常包含的中间体分子量大、结构复杂、成本高、耗时长，通常难以进行实验室数据收集，在生物制药过程中也常常因为微生物培养时间周期长、基因工程技术成本较高，难以顺利完成生命周期清单数据收集。

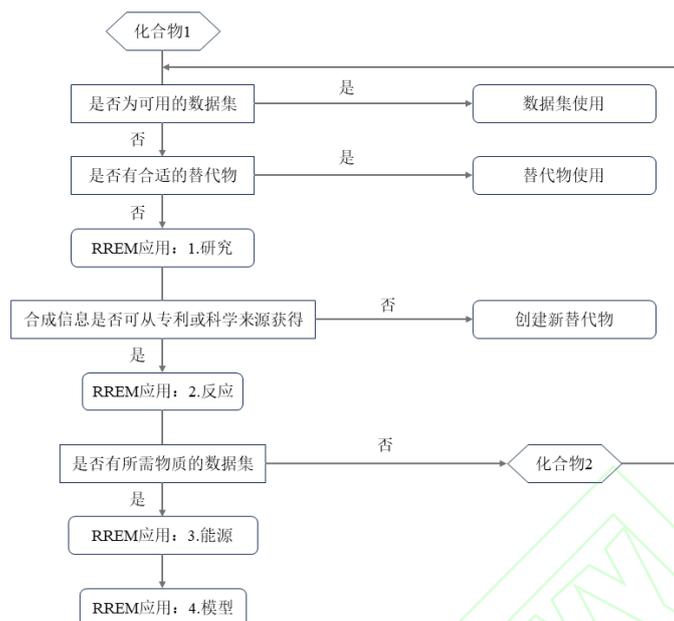


图3 应用 RREM 之前和期间的问题和决策

注：六边形框代表化学品；矩形表示应用 RREM 时出现的问题；圆角矩形表示需要执行的操作<sup>[56]</sup>。

(3) **数据质量不高**。由于清单数据一般来源于专利、行业报告或文献等，且通常使用的是前一年或更早时期的数据，数据质量偏低。一般来说，越接近实际生产情况，数据质量越高，如直接从制造商获得的生产数据对于生命周期评价结果更为准确。但是，大多数学者难以与制造商直接合作，生产数据很难获取，只能采用近两三年平均行业数据、实验室数据或文献中数据。例如，Ott 等<sup>[21]</sup>对鲁非酰胺的数据建模过程中，一部分来源于实验室数据，一部分来源于文献数据，还有一部分来源于化工手册和书籍等。因此，需要每隔一段时间验证研究以确保结果准确。然而，生命周期评价结果验证很少，因为即使遵循了共同的指导方针，也很难比较不同研究的环境影响结果。在进行验证时，通常会产生重大差异（例如，在 1 项对 13 种塑料回收研究的验证中，验证差异达 270%~570%<sup>[58]</sup>）。此外，由于不同国家、不同区域之间材料和技术性存在差异性，调用非本土化数据库会导致生命周期评价结果不确定性增加。

(4) **生命周期影响评价方法不统一**。生命周期影响评价方法主要有中点法和终点法这两种类型，中点法是以污染物当量来表征环境影响，计算过程不确定性低，结果科学性高；终点法是以损害评估为主的方法，更多关注受体（如人体健康、生态系统等）暴露于排放物质后所产生的综合环境损害，评估不确定性略高于中点法。而对于医药生命周期评价研究中，环境影响评价方法多不统一，难以比较。如 Siegert 等<sup>[29]</sup>对布洛芬药的生命周期影响评价方法中选用 CML 2001（中点法）；杨珂宣等<sup>[23]</sup>对盐酸环丙沙星药物选用 Eco-indicator 99 方法（终点法）。而中点法和终点法都是基于特定区域开发生命周期评价模型，在使用时针对同一研究对象，选用不同的评价模型结论差异巨大。

## 4 结论与展望

本文主要从药物生产、医疗器械、医疗服务三个方面综述了目前生命周期评价在国内外医药领域的应用现状和研究进展。结果表明，目前医药领域 LCA 研究取得了一定的成效，LCA 作为一种系统的环境影响评价方法可为医药行业的绿色可持续发展提供广泛的支持与参考。具体内容上，现阶段医药领域 LCA 研究多集中于药物生产方面，旨在不断寻求绿色生产工艺，研究范围多取为“摇篮-大门”，即“原材料输入-制剂生产”；对医疗器械和医疗服务方面的研究多侧重于一次性和可重复性医疗产品生命周期结束阶段的环境影响。目前，仍存在药品和医疗产品 LCA 研究较少、医药数据收集困难、数据质量不高、生命周期影响评价方法不统一等问题。基于现阶段 LCA 方法在医药领域内的研究现状，展望如下：

(1) **进一步推广 LCA 在药品和医疗产品绿色设计与制造中的应用**。目前，在医药领域的 LCA 研究

相对有限，可进一步基于生命周期思想对药物和医疗器械开展绿色设计与绿色制造。

(2) **继续完善医药数据收集，建立医药行业生命周期清单数据库。**可通过加强学术界和医药企业合作，尽可能地从医药企业获得生产工艺数据；对于未收集到的 LCI 数据，可通过逆合成分析法或 RREM 模型等方法建立合适的数据收集方法；加快建立符合中国国情的高质量本土医药生命周期清单数据库，可结合 5G、大数据、区块链等技术，发挥工业互联网标识解析体系作用，提升数据监测、采集、存储、核算、校验的可靠性与即时性。尤其是基于“双碳”目标，构建适用于医药领域的碳排放因子数据库，对药物中间体碳排放核算具有重要意义。

(3) **持续提高医药领域生命周期清单数据质量。**由于企业生产设备、器材的更新迭代，对生产过程中材料、能源消耗难免会有差异，应尽可能地从数据来源（现场生产数据、行业报告、文献资料、计算推理等）、时间代表性（与时间无关或 3 年内、6 年内、10 年内等）、技术代表性（所用技术、相似技术替代等）和地理方位（区域、本国、国外等）等指标从高到低递减式获取相关数据，优先选用具有计量溯源性的数据，并对核算结果和数据进行不确定度分析。

(4) **建立统一的医药生命周期评价方法研究标准。**当前，生命周期影响评价在医药领域内的研究中，由于缺乏统一的规则，导致研究结果差异性甚远。虽然之前也有研究提出制药产品和工艺的产品类别规则，但对一些药物的使用阶段和生命周期结束阶段并没有提出相应的研究准则。因此，亟需生命周期评价方法在医药领域内建立起全面、系统的产品类别规则。

(5) **进一步完善医药领域生命周期评价体系。**可加强医药领域生命周期碳足迹、水足迹研究，并结合生命周期能源评估（LCEA）、技术经济性分析等方法综合评价，促进医药领域多目标可持续发展。

#### 参考文献

- [1] International Organization for Standardization. Environmental management life cycle assessment principles and framework: ISO 14040[S]. British: International Standard, 2006.
- [2] 刘蔚, 毛开伟, 张廷军等. 生命周期评价体系的开发及其在生物质资源化领域的应用进展[J]. 环境工程, 2019, 37: 384-388.  
LIU Wei, MAO Kaiwei, ZHANG Tingjun, et al. Development of life cycle assessment and application in biomass resource recovery[J]. Environmental Engineering, 2019, 37: 384-388.
- [3] International Organization for Standardization. Environmental management life cycle assessment requirements and guidelines: ISO 14044[S]. British: International Standard, 2006.
- [4] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 446-455.  
ZHAI Yijie, ZHANG Tianzuo, SHEN Xiaoxu, et al. Development of life cycle assessment method[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 446-455.
- [5] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242.  
WANG Changbo, ZHANG Lixiao, PANG Mingyue. A review on hybrid life cycle assessment: Development and application[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1232-1242.
- [6] 亿科环境科技[EB/OL]. <https://www.ike-global.com/products-2/chinese-lca-database-clcd>.
- [7] 邹伦贵. 碳足迹认证 LCA 数据库应用现状研究[J]. 中国质量, 2023(8): 92-95.  
ZOU Lungui. Research on application status of carbon footprint certification LCA database[J]. China Quality, 2023(8): 92-95.
- [8] DREYER Louise Camilla, NIEMANN Anne Louise, HAUSCHILD Michael Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and eco-indicator 99[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(4): 191-200.
- [9] 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.  
XIE Minghui, MAN Hecheng, DUAN Huabo, et al. Research progress on the life cycle impact assessment methods and their localization in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 2148-2156.
- [10] TOFFOLETTO Laurence, BULLE Cécile, GODIN Julie, et al. LUCAS - A new LCIA method used for a canadian-specific

- context[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12(2): 93-102.
- [11] JANE Bare. TRACI 2.0: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2011, 13(5): 687-696.
- [12] AUDENAERT Amaryllis, CLEYN De H Sven, BUYLE Matthias. LCA of low-energy flats using the Eco-indicator 99 method: Impact of insulation materials[J]. *Energy Buildings*, 2012, 4768-4773.
- [13] OLIVIER Jolliet, MANUELE Margni, RAPHAËL Charles, et al. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(6): 324-330.
- [14] MIKOŁAJ Owsianiak, ALEXIS Laurent, ANDERS Bjørn, et al. IMPACT 2002+, ReCiPe 2008 and ILCD's recommended practice for characterization modelling in life cycle impact assessment: A case study-based comparison[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(5): 1007-1021.
- [15] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(2): 234-237.  
YANG Jianxin, WANG Rusong, LIU Jingru. Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(2): 234-237.
- [16] 王洪涛. 通往节能减排目标的新途径——生命周期节能减排评价方法[J]. *高科技与产业化*, 2011(8): 49-53.  
WANG Hongtao. A new approach to the target of energy saving and emission reduction—Life cycle assessment method for energy saving and emission reduction[J]. *High-Technology & Industrialization*, 2011(8): 49-53.
- [17] 李晶莹. 焦化多联产系统的生命周期评价与系统分析[D]. 西安: 西北大学, 2018.  
LI Jingying. Life cycle assessment and system analysis of coking poly-generation system[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [18] MARC-WILLIAM Siegert, ANNEKATRIN Lehmann, YASMINE Emara, et al. Harmonized rules for future LCAs on pharmaceutical products and processes[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(6): 1040-1057.
- [19] ROSCHANGAR Frank, LI Jun, ZHOU Yanyan, et al. Improved iGAL 2.0 metric empowers pharmaceutical scientists to make meaningful contributions to united nations sustainable development goal 12[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(16): 5148-5162.
- [20] RAYMOND Michael J, SLATER C Stewart, SAVELSKI Mariano J. LCA approach to the analysis of solvent waste issues in the pharmaceutical industry[J]. *Green Chemistry*, 2010, 12(10): 1826-1834.
- [21] OTT Denise, BORUKHOVA Svetlana, HESSEL Volker. Life cycle assessment of multi-step rufinamide synthesis—from isolated reactions in batch to continuous microreactor networks[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(4): 1096-1116.
- [22] KONG Weixin, LV Bihong, YANG Siqi, et al. Case study on environmental safety and sustainability of pharmaceutical production based on life cycle assessment of enrofloxacin[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105734.
- [23] 杨珂宣. 药品生产工艺环境绩效评价模型及 LCA 优化研究——以乳酸环丙沙星为例[D]. 泉州: 华侨大学, 2021.  
YANG Kexuan. Research on environmental performance evaluation model and LCA optimization of pharmaceutical production process[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2021.
- [24] AMADO ALVIZ Patricia Lucia, ALVAREZ Alejandro J. Comparative life cycle assessment of the use of an ionic liquid ([Bmim]Br) versus a volatile organic solvent in the production of acetylsalicylic acid[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 1614-1624.
- [25] HADINOTO Kunn, TRAN The-Thien, CHEOW Wean Sin. Beyond Tablets' physical characteristics: Incorporating environmental sustainability metrics into the selection of lubricants for pharmaceutical tableting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362: 132336.
- [26] SHARMA Rachit Kumar, RAJU Geo, SARKAR Prabir, et al. Comparing the environmental impacts of paracetamol dosage forms using life cycle assessment[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 24(10): 1-21.
- [27] BASSANI Fabiana, RODRIGUES Carla, MARQUES Pedro, et al. Ecodesign approach for pharmaceutical packaging based on Life Cycle Assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151565.
- [28] BASSANI Fabiana, RODRIGUES Carla, MARQUES Pedro, et al. Life cycle assessment of pharmaceutical packaging[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2022, 27(7): 978-992.
- [29] SIEGERT Marc-William, SALING Peter, MIELKE Pascal, et al. Cradle-to-grave life cycle assessment of an ibuprofen

- analgesic[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2020, 18: 100329.
- [30] ARGOU D Sarah, BUDZINSKI Kristi, D'AQUILA Daniel, et al. Green metrics for biologics[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2022, 35: 100614.
- [31] RENTERIA GAMIZ Ana Gabriela, DEWULF Jo, DE SOETE Wouter, et al. Freeze drying in the biopharmaceutical industry: An environmental sustainability assessment[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, 117: 213-223.
- [32] 尹阳阳. 基于 LCA&LCC 的生物质能源气化循环利用系统的综合评价[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
YIN Yangyang. Comprehensive evaluation of biomass gasification and recycling system based on LCA&LCC[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [33] LIU Yigang, LI Guoxuan, CHEN Zhengrun, et al. Comprehensive analysis of environmental impacts and energy consumption of biomass-to-methanol and coal-to-methanol via life cycle assessment[J]. *Energy*, 2020, 204: 117961.
- [34] 刘梦佳, 杨茂华, 刘新育, 等. 中药渣处理及其生命周期分析的研究进展[J]. *时珍国医国药*, 2021, 32(7): 1714-1717.  
LIU Mengjia, YANG Maohua, LIU Xinyu, et al. Research progress on treatment and life cycle analysis of traditional Chinese medicine residue[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2021, 32(7): 1714-1717.
- [35] SOUSA Ana Catarina, ANA Rita Veiga, ANA Colette Mauricio, et al. Assessment of the environmental impacts of medical devices: a review[J]. *Environment Development and Sustainability*, 2021, 23(7): 9641-9666.
- [36] YAMANOOR Srihari. Do Medical Device Designers Need to Care about Life Cycle Assessment?[C]// *Materials and Processes for Medical Devices Conference and Exposition*. Minneapolis, USA: Materials and Processes for Medical Devices American Society for Metals, 2011.
- [37] MOULTRIE James, SUTCLIFFE Laura, MAIER Anja. A maturity grid assessment tool for environmentally conscious design in the medical device industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 122: 252-265.
- [38] GAVILÁN-GARCÍA Irma C, FERNÁNDEZ-VILLAGOMEZ Georgina, GAVILÁN-GARCÍA Arturo, et al. Alternatives of management and disposal for mercury thermometers at the end of their life from Mexican health care institutions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 118-124.
- [39] UNGER Scott, LANDIS Amy. Assessing the environmental, human health, and economic impacts of reprocessed medical devices in a Phoenix hospital's supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1995-2003.
- [40] GOULET Brandon, OLSON Lars, MAYER Brooke. A comparative life cycle assessment between a metered dose inhaler and electric nebulizer[J]. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1725.
- [41] TABATABAEI Meisam, HOSSEINZADEH-BANDBAFHA Homa, YANG Yi, et al. Exergy intensity and environmental consequences of the medical face masks curtailing the COVID-19 pandemic: Malign bodyguard?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 313: 127880.
- [42] VAN STRATEN Bart, LIGTELIJN S, DROOG L, et al. A life cycle assessment of reprocessing face masks during the Covid-19 pandemic[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 17680.
- [43] SCHULTE Anna, MAGA Daniel, THONEMANN Nils. Combining life cycle assessment and circularity assessment to analyze environmental impacts of the medical remanufacturing of electrophysiology catheters[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2): 898.
- [44] MEISTER Julia A, SHARP Jack, WANG Yan, et al. Assessing long-term medical remanufacturing emissions with life cycle analysis[J]. *Processes*, 2022, 11(1): 36.
- [45] FREUND Julissa, GAST Katherine, ZUEGGE Karin, et al. Environmental considerations in the selection of medical staplers: A comparative life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 371: 133490.
- [46] Snigdha, HILOIDHARI Moonmoon, BANDYOPADHYAY Somnath. Environmental footprints of disposable and reusable personal protective equipment - a product life cycle approach for body coveralls[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 394: 136166.
- [47] ECKELMAN Matthew J, SHERMAN Jodi D. Estimated global disease burden from US health care sector greenhouse gas emissions[J]. *American Journal of Public Health*, 2018, 108(S2): S120-S122.
- [48] GORDON Ilyssa O, SHERMAN Jodi D, LEAPMAN Michael, et al. Life cycle greenhouse gas emissions of gastrointestinal biopsies in a surgical pathology laboratory[J]. *American Journal of Clinical Pathology*, 2021, 156(4): 540-549.

- [49] THIEL Cassandra L, ECKELMAN Matthew, GUIDO Richard, et al. Environmental impacts of surgical procedures: Life cycle assessment of hysterectomy in the United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(3): 1779-1786.
- [50] LICHTER Katie E, CHARBONNEAU Kiley, SABBAGH Ali, et al. Evaluating the environmental impact of radiation therapy using life cycle assessments: A critical review[J]. *International Journal of Radiation Oncology\*Biophysics*, 2023, 117(3): 554-567.
- [51] THIEL Cassandra L, CASSELS-BROWN Andy, GOEL Hena, et al. Utilizing off-the-shelf LCA methods to develop a 'triple bottom line' auditing tool for global cataract surgical services[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 158: 104805.
- [52] HERNÁNDEZ-DE-ANDA Marco T, TABOADA-GONZÁLEZ Paul, AGUILAR-VIRGEN Quetzalli, et al. Environmental impacts of a Mexican hemodialysis unit through LCA[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135480.
- [53] PURNIMA Aishwarya Prasad, DHARUVI Joshi, JENNIFER Lighter, et al. Environmental footprint of regular and intensive inpatient care in a large US hospital[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2022, 27(1): 38-49.
- [54] CIMPRICH Alexander, YOUNG Steven B. Environmental footprinting of hospitals: Organizational life cycle assessment of a Canadian hospital[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2023, 27(5): 1335-1353.
- [55] OTT Denise, KRALISCH Dana, DENČIĆ Ivana, et al. Life cycle analysis within pharmaceutical process optimization and intensification: Case study of active pharmaceutical ingredient production[J]. *ChemSusChem*, 2014, 7(12): 3521-3533.
- [56] HUBER Elena, BACH Vanessa, HOLZAPFEL Peter, et al. An approach to determine missing life cycle inventory data for chemicals (RREM)[J]. *Sustainability*, 2022, 14(6): 3161.
- [57] PARVATKER Abhijeet G, TUNCEROGLU Huseyin, SHERMAN Jodi 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 Chemistry & Engineering*, 2019, 7(7): 6580-6591.
- [58] CREADORE Lauren T, CASTALDI Marco J. Quantitative comparison of life cycle assessments of advanced recycling technologies for end-of-life plastics[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2023, 145(4): 042201.