

DOI: 10.12046/j.issn.1000-5277.2022.04.003

文章编号: 1000-5277(2022)04-0020-12

资源循环与碳中和专栏介绍:

国家重点研发计划“固废资源化”重点专项“东南轻工建材特色产业集聚区固废综合利用集成示范”(2019YFC1904500)由福建师范大学牵头,联合10家单位共同承担。项目以泉州市为依托,以聚酯织物、混纺织物、鞣前牛毛、皮革、鞋材和石材磨切粉料等固废为重点研究对象,在区域固体废物代谢数据库及分析模型基础上,突破集聚区跨产业固废梯级利用核心技术,建设示范工程,形成综合解决方案,并打造为解决国内同类问题的样板,为打赢区域“蓝天、碧水、净土”三大污染防治攻坚战、推动无废城市建设提供理论、技术和产业支撑。

经过两年的实施,该项目完成了纺织服装、制革制鞋、石材加工三大行业主要固废种类识别和产量估算,梳理了共生利用技术链条,建立了行业共生范式案例库;基于纺织服装固废涤纶含量的差异开发了梯次利用关键技术,形成了微醇解-自缩聚、温和可控醇解、非织造再生的完整技术链条;建成了一套制革制鞋固废温室连续超微粉碎装备,进行了鞣前牛毛生物酶提取改性制备皮革精细化学品技术和皮胶原纤维物理改性再制造复合皮革技术升级及其功能性复合皮革的研究;完成了有机人造石磨切废粉改性研究和高强水泥砂浆设备的构建,改造建设了有机人造石示范线;理清了东南轻工建材跨产业废气废水的特征污染物,设计了一体化废气治理装备,建立了废水处理中试基地。本项目实现了固废在集聚区内进行自我闭环的循环经济模式,提高本集聚区环境效益、社会效益的同时,也产生了良好的经济效益。

生命周期评价在轻工行业的应用及研究进展

王雅君¹, 孙光亚¹, 安攀¹, 曹馨², 陈庆华³

(1. 中国石油大学(北京)新能源与材料学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249;

3. 福建师范大学聚合物资源绿色循环利用教育部工程研究中心, 福建 福州 350007)

摘要:在我国“双碳”目标的大背景下,各行业均针对高污染、高耗能的生产工艺开发低碳节能替代技术。而当一种新方案代替现有生产方案时,资源环境影响会在不同阶段、不同类型之间发生转移,难以识别与核算。因此,迫切需要系统、科学的方法对产品或技术的资源环境效率进行分析评价。生命周期评估(life cycle assessment, LCA)可帮助技术开发者对研究对象整个生命周期的潜在资源环境影响进行量化,核算不同生产物料或不同生命周期阶段所产生的环境负荷,为提高生产技术的资源环境效率提供数据支持与改进思路。对生命周期的基础思想、基本方法框架以及相关软件与数据库的使用情况进行了简要介绍,重点分析LCA在纺织、制革以及其他轻工领域中的应用现状,并结合国内外最新研究进展对生命周期评价相关研究的发展方向进行展望。

关键词: 环境影响评价; 生命周期评估; 轻工业; 碳足迹; 资源利用

中图分类号: X32 **文献标志码:** A

Application and Research Progress of Life Cycle Assessment in Light Industry

WANG Yajun¹, SUN Guangya¹, AN Pan¹, CAO Xin², CHEN Qinghua³

(1. College of New Energy and Materials, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. School of Economics and Management, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Engineering Research Center of Polymer Green Recycling of Ministry of Education,

Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 国家重点研发计划“固废资源化”重点专项(2019YFC1904500); 国家自然科学基金资助项目(21777080); 中国石油大学(北京)科研基金(2462019QNXZ05、2462020YXZZ018); 重质油国家重点实验室自主项目资助

通信作者: 王雅君(1984—),女,副研究员,博士生导师,研究方向为环境光催化、生命周期评价。wangyajun@cup.edu.cn

Abstract: Under the background of China's "dual carbon" goal, new low-carbon and energy-saving alternative technologies are developed to substitute high-pollution and high-energy-consuming production processes. When a new technology replaces the existing technology, there will be a transfer of resource and environmental impact between different stages and types, which is difficult to identify and calculate. Therefore, there is an urgent need for systematic and scientific methods to analyze and evaluate the resource and environmental efficiency of products or technologies. Life Cycle Assessment (LCA) can help researcher to quantify the potential resource and environmental impact of the entire life cycle of the object, and calculate the environmental load generated by different materials or life cycle stages, so as to provide data support and ideas for improving the resource and environmental efficiency of production technology. This paper introduces the basic idea of LCA, the methodological framework and the use of related software and databases, emphatically analyzes the application status of LCA in textile, tanning and other light industries, and prospects the development direction of LCA research in combination with the latest research progress at home and abroad.

Key words: environmental impact assessment; life cycle assessment; light industry; carbon footprint; resource utilization

轻工产业在我国发展历史悠久,已经成为支撑我国外汇出口的第一大产业^[1],其利润总额达到全国工业的20%以上,轻工产品中的塑料、纺织品、皮革、建材家具等百余种产品的产量均居世界第一。如此庞大的生产与消费规模在消耗各种原料资源的同时也必然导致大量废弃产品需要处理,在可持续发展以及我国“双碳”目标的大背景下,对现有高污染、高耗能的生产技术进行改良升级以及采用高效、绿色的回收方式对废弃产品进行循环利用已成为必然趋势,各企业单位、科研院所的废弃产品再生循环技术不断推陈出新。而当对一项新产品或新技术进行环境影响分析时,如何评定该产品或技术的潜在资源环境影响;对比传统生产方式,如何量化新技术所产生的环境效益等成为不可避免的话题。合理运用客观、系统、全面的环境影响评价方法显得尤为重要。

如图1所示,人类所生产的所有产品均会经过“资源开采→各种中间原料/能源生产→最终产品生产→废弃/循环”的过程,该历程被国际环境毒理与化学学会(SETAC)定义为某产品的生命周期^[2],并于1993年正式提出生命周期评估(LCA)的概念。

若从LCA角度出发,生产过程中某一个环节或某一种污染物的零排放并不等同于低碳绿色,各种资源环境问题都应放到产品的整个生命周期中考虑。LCA研究的基本思路是对某产品上游材料的生产过程与其下游的消费、废弃过程进行追溯^[3-4],并通常细分为生产、运输、使用以及废弃4个生命周期阶段^[5-6](摇篮到坟墓),进而分析、核算某类产品潜在的资源消耗量与污

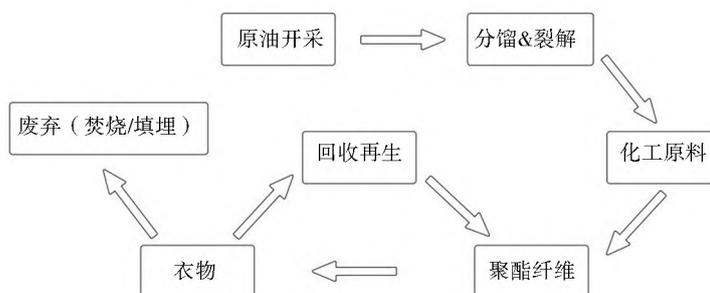


图1 纺织产品的生命周期

Fig. 1 Life cycle of textile products

染物排放量。生命周期评估可以帮助技术开发者识别并量化^[7]不同物料或生产环节所导致的不同类型的环境影响,并避开了当一种新的技术方案替代现有生产方案时资源环境影响在不同阶段、不同类型之间发生转移的问题。

总之,LCA可以用于分析各种产品或技术在生命周期全过程中潜在的资源环境影响,是系统化、全面化、量化分析资源环境效率问题的标准方法。本文将从LCA基本思想框架出发,探讨近年LCA在我国轻工领域的研究与应用,并结合国内外最新研究进展对生命周期评价研究的发展方向进

行展望.

1 LCA 方法框架与建模工具

1.1 LCA 的基本方法框架

1997年,第一个LCA方法国际标准ISO 14040^[8]正式发布,标志着LCA方法成为国际标准,由各个国家的标准机构共同批准,也被各个国家所采用.如在中国,ISO 14040 LCA标准被等同转化为中国国家标准GB/T 24040.

尽管LCA方法标准经过了一系列的发展(图2),但LCA方法框架基本保持不变,分为以下4部分^[9].

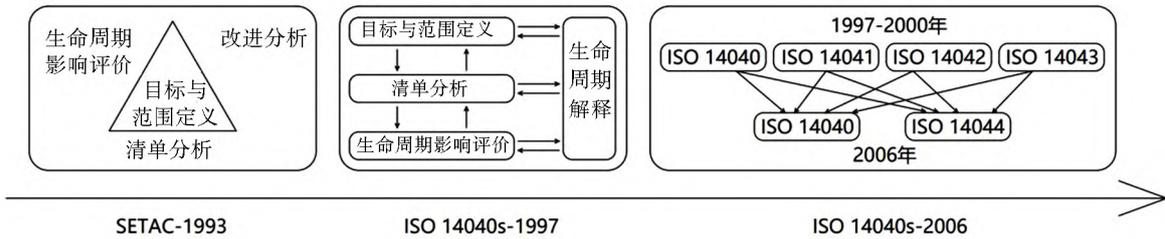


图2 持续发展的LCA国际标准

Fig.2 Development of LCA international standards

第一部分: 目标与范围定义 (goal and scope definition), 即在软件建模和开展生命周期评估前需要确定的工作目标和范围. 对于LCA而言, 首先需要确定研究对象(包括产品或技术), 明确开展LCA研究的原因、应用目的以及想要解决的问题等. 其次, 清晰的系统边界是准确核算LCA指标结果的先决条件, 需要考量研究对象的生命周期过程与资源环境影响类型这两个维度的具体范围.

第二部分: 生命周期清单分析 (life cycle inventory analysis, LCI), 实景数据的收集与使用数据库建立完整的LCA模型是LCI中最主要的工作, 也是LCA研究过程中工作量比较大的部分. 通过数据收集, LCA模型可量化描述产品生命周期每个过程发生的各项资源消耗与污染排放, 各个阶段汇总求和可以得到产品生命周期的环境负荷总量, 称为生命周期清单结果, 也称为LCI结果, 是后面进一步分析评价的基础.

第三部分: 生命周期影响评价 (life cycle impact assessment, LCIA), 目的是把各种资源消耗、环境排放整合在一起, 根据不同行业特点转换为研究者最关心的资源环境影响类型指标. 例如全球变暖潜势(碳足迹^[10-11])、水足迹、化石能源消耗指标、酸化指标、富营养化指标等(表1), 称为特征化指标, 也称为LCIA指标. LCIA指标与LCI结果统称为LCA结果.

表1 LCA的主要环境影响指标类型

Tab.1 Main environmental impact indicators of LCA

环境影响指标	指标单位	主要清单物质
全球变暖潜势	kg CO ₂ eq.	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O……
矿物资源消耗	kg Sb eq.	Fe, Mn……
酸化效应	kg SO ₂ eq.	SO ₂ , NO _x , NH ₃ ……
光化学臭氧生成	kg NMVOC eq.	C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ ……
富营养化—水体	kg P eq./kg N eq.	NH ₃ -N……
富营养化—陆地	mol N eq.	P, N……
臭氧层消耗	kg CFC-11 eq.	CCl ₄ , C ₂ H ₃ Cl ₃ , CH ₃ Br……

第四部分: 生命周期解释 (life cycle interpretation), 对LCA结果进行分析并得出结论, 包括总结造成环境影响的主要因素或来源、探讨不同技术方案的优劣、说明数据质量评估结果等等, 进而识别技术改进重点并提出优化建议.

上述4部分称为LCA方法框架, 体现了LCA方法的基本思路. 若研究对象的建模模型完整, 则

该生命周期过程中任何潜在的资源消耗或污染排放均会体现在 LCA 数据结果中,进而量化出人类在生产、使用某一产品过程中付出的资源环境代价.故 LCA 结果可作为资源环境效率指标,为描述人类生产消费活动与自然环境之间的复杂关系以及提高产品的资源环境效率提供可靠依据.

1.2 LCA 软件与数据库

国外早在 20 世纪 60 年代即开展 LCA 方法的研究与应用,为提高研究人员的工作效率,建立了系统详实的 LCA 专业数据库,帮助科研人员对研究实例进行建模与数据核算.如德国斯图加特大学与 PE 公司共同开发的 GaBi 数据库、瑞士 Ecoinvent 数据库、荷兰 IVAM 数据库以及美国 LCI 数据库等等.日本的 LCA 体系由两家单位合作开发,日本产业环境管理协会(JEMAI)开发了 MiLCA 软件,日本产业技术综合研究所(AIST)则负责整理日本 IDEA 数据库.

我国生命周期评估的数据库建立与软件开发起步较晚,北京工业大学材料学院^[12]曾在“973”、“863”等国家科技计划的支撑下,采集并整合了我国 10 余万条 LCA 环境负荷数据,建立了中国材料环境数据库(sino center),其中包括大宗能源、工业资源、交通运输、有机及无机材料、金属材料等等,并成功实现商用,为我国生产技术评价、节能减排事业提供了基础数据支撑.此外,四川大学王洪涛团队^[13]还基于其自主研发的 CLCD 本地数据库开发了在线生命周期评估平台 eFootprint,同样在我国产品或技术的环境影响分析中得到广泛使用.

虽然 LCA 在全球范围均有广泛应用,但目前只有德国 GaBi(GaBi 软件、GaBi 数据库)、中国亿科(eFootprint 软件、CLCD 数据库)同时开发了通用专业软件和基础数据库,形成了独立的 LCA 体系.截止至 2020 年,除欧洲、日本、中国的 LCA 体系之外,其他国家都没有建立自己的 LCA 体系,包括美国、加拿大、澳大利亚等发达国家也普遍在使用欧洲的 LCA 数据库.目前数据库比较完善且得到国内外研究人员普遍认可的软件有 GaBi、SimaPro、OpenLCA、Umberto 等^[14-15].

经过多年发展,LCA 软件已经可以实现如特征化指标、归一化结果(即去单位化,用于衡量某项环境指标对最终结果产生的影响)、敏感性分析^[16](可找出对 LCA 结果影响最大的关键清单数据与原始数据)等基础指标核算和高级数据分析,能够帮助 LCA 研究人员高效地完成科研任务.随着 LCA 体系框架的发展以及软件与数据库的完善,生命周期评估愈加成为系统科学的资源环境评价方法,应用于越来越多的行业和领域^[17-18].

2 LCA 在轻工行业中的应用

我国生产的皮革占世界总产量的 20%以上,纺织品加工量更是超过了全球总加工量的 50%.作为我国轻工领域的支柱产业,纺织、制革以及其他轻工材料的生产制造均在我国国民经济中占有举足轻重的地位.但在轻工产品的加工过程中直接或间接消耗的原料资源数量庞大且种类繁多,对生态环境和人类健康造成了巨大影响.在我国“双碳”目标的大背景下,从全生命周期角度对轻工产品的资源环境效率进行评价将对促进节能减排、减污降碳大有裨益.

国内外学者为分析纺织、皮革等轻工产品的资源环境影响进行了大量 LCA 研究,对生产工艺改进、相关政策制定提供了必要的的数据支撑与决策思路.

2.1 纺织行业

全球变暖潜势(碳足迹)是目前纺织领域 LCA 研究人员重点关注的环境影响指标.东华大学工业碳足迹项目组^[19]曾开发出专用于服装纺织产品的 LCA 核算软件—DHU,并基于同一款印花布产品的数据清单在 DHU 软件及另外两款 LCA 软件上进行建模与数据对比分析,结果表明每米产品的全球变暖潜势在不同软件上相差 50 g CO₂ eq. 以上.由于不同软件特征化因子^[20]、排放系数上的差异,同一研究对象在不同软件上建模所得到的环境影响结果也不尽相同,因此研究者在进行生命周期评估时,应结合研究对象的性质以及研究目的对数据库及建模软件进行合理选择.GaBi 软件在数据集数量上拥有很大优势,软件与数据库彼此独立,对于用户而言灵活度较高,但操作也相对复杂.赵年花等^[21]通过 GaBi 软件对涤纶产品的生命周期过程进行建模,依照 ISO 14040 标准从涤纶产品的生命周

期过程(图3)中选取了包括长丝生产、织造、染整在内的6个环节作为系统边界并进行碳足迹分析,从而核算出不同环节对碳排放指标的贡献率,结果表明约60%的碳排放来自于纺织物的染整工序,应作为重点改进环节。SimaPro软件则整合了不同数据库,软件数据来源清晰,操作指令简单易学。李戎等^[22]使用该软件核算了贡缎在不同生命周期环节的碳排放贡献率,分析出原料加工过程对碳足迹的贡献最大,其次为污水处理,因此生产企业应尽量购买纯棉原料,减少用水量并降低污水的COD值。利用LCA方法可对同一类产品的不同生命周期阶段进行特定指标的排放影响贡献率研究,亦可实现针对不同产品^[23]的环境影响对比分析,如Yan等^[24]将毛织物和棉织物细分为13种产品类型,对其进行LCA研究,结果表明毛类织物的碳排放量明显高于棉类织物,平纹工艺比罗纹工艺具有更高的碳排放且会随着颜色加深而升高,其中电力消耗是纺织面料工业碳足迹的主要来源,对于普通消费者而言,选择棉纺织品、轻质材料并减少毛纺织品的使用将有助于降低温室气体的排放。

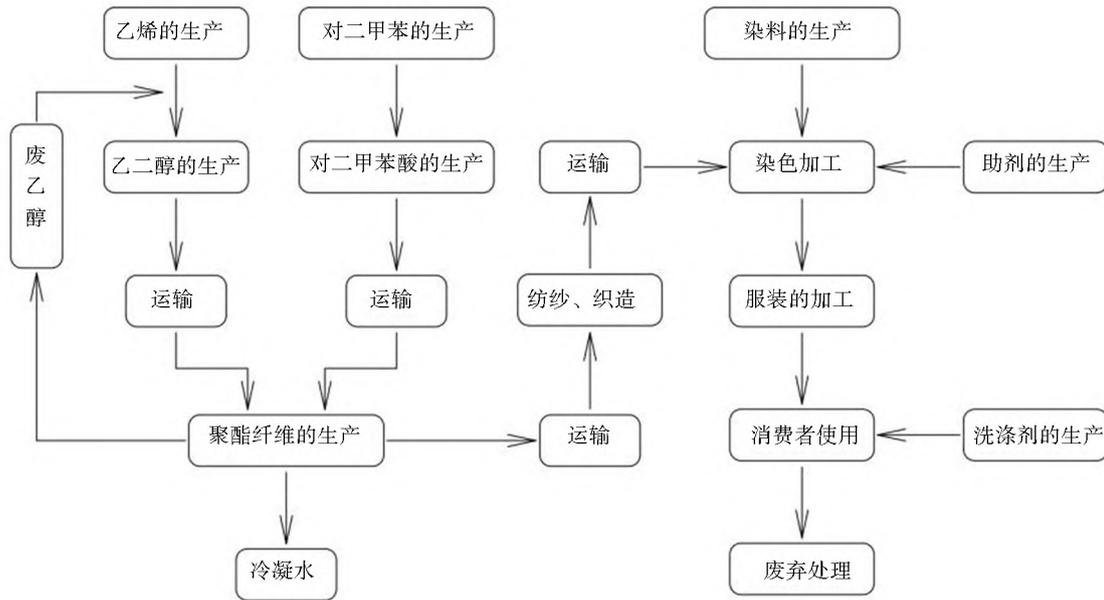


图3 涤纶纺织品的生命周期过程(从摇篮到大门)

Fig. 3 Life cycle process of polyester textiles (cradle-to-gate)

生命周期评估广泛应用于全球变暖潜势的量化核算^[25-28],除该指标外,LCA还可用于分析纺织产品生命周期过程的水足迹^[29]、化石能源消耗、人体毒性等多项环境影响指标^[30-31]。有国外学者曾提出当研究对象的生命周期涉及农业、林业(如土地自然培育的生物基纺织品——棉花、木质纤维等)时,应重点关注水足迹、土地利用等指标,使得LCA基础数据更加详实全面。Sandin等^[32]通过LCA方法核算了棉花与木质纤维等相关产品的生产过程对水资源和土地利用的影响,结果表明产品加工的地理位置是影响水足迹的主要因素。因为从水资源相对匮乏的环境中获取水将造成更大的环境负荷,而土地利用评价则涉及环境影响的转移分配问题,需要进一步探讨研究。此外,指标类型全面的LCA研究结果还可用于企业、工厂的环境评估报告或产品绿色宣传,如Levi's公司^[33]曾在2013年对该公司生产的牛仔裤产品进行生命周期评估,核算了牛仔裤在纤维生产加工、物流运输直至淘汰废弃等若干环节的环境负荷(表2),环境影响类型包括全球变暖潜势、富营养化指标以及非生物性资源消耗指标等等,为该公司进一步制定绿色生产计划及相关政策提供了数据支持。

我国每年产生超过2000万吨的废旧纺织产品,再生利用率却仅有15%,若采用高效绿色的再生技术对废旧纺织品进行回收利用,必然会产生很高的环境效益与经济效益^[34]。纺织品废弃后的常规处理方式共有4种:填埋、焚烧、再生循环以及二次使用(简单翻新)。其中二次使用可延长纺织品的生命周期,对环境影响最小^[35]。其次是再生循环,施乐荣等^[36]曾对深圳市生活垃圾中废旧纺织品的“单独分拣再生循环、混合其他垃圾填埋、混合其他垃圾焚烧”3种处理模式(图4)进行LCA对比分析,结果表明若对废纺进行再生循环可减少5%以上的二氧化碳排放当量。Zamani等^[37]核算了

废弃纺织品的不同回收技术所造成的环境影响, 包括废纺材料的再利用、使用化学溶剂分离纤维素以及聚酯的化学回收, 通过 LCA 分析可知, 若根据不同功能特点对 3 种回收技术进行整合使用, 每处理 1 t 废纺可减少 10 t CO₂ 排放当量和 169 GJ 的一次能源消耗. Subramanian 等^[38] 开发了一种可将棉涤纺织废料转化为 PET 纤维并副产葡萄糖的生物循环技术, 并基于 LCA 方法识别出纺织品生物回收工艺流程 (图 5) 中潜在环境影响发生的重点环节.

表 2 Levi's 公司牛仔裤产品环境影响评价指标结果

Tab. 2 Results of environmental impact assessment indicators for Levi's jeans

生命周期阶段	纤维原料	布料加工	切割缝制	后处理与包装	物流与零售	使用阶段	废弃	合计
全球变暖潜势 (kg CO ₂ eq.)	2.9	9.0	2.6	1.7	3.8	12.5	0.9	33.4
	9%	27%	8%	5%	11%	37%	3%	100%
水资源消耗指标 (m ³)	2.565	0.236	0.034	0.077	0.010	0.860	0	3.781
	68%	6%	1%	2%	0%	23%	0%	100%
富营养化指标 (g PO ₄ eq.)	18.0	5.5	2.9	7.9	3.1	7.9	3.5	48.9
	37%	11%	6%	16%	6%	16%	7%	100%
土地利用指标 (m ² · a ⁻¹)	9.3	0.2	0	0.5	0.3	1.7	0	12.0
	78%	1%	0%	4%	2%	14%	0%	100%
非生物资源消耗 (mg Sb eq.)	19.9	7.2	1.9	118.5	4.4	17.9	0.1	29.1
	12%	4%	1%	70%	3%	11%	0%	100%

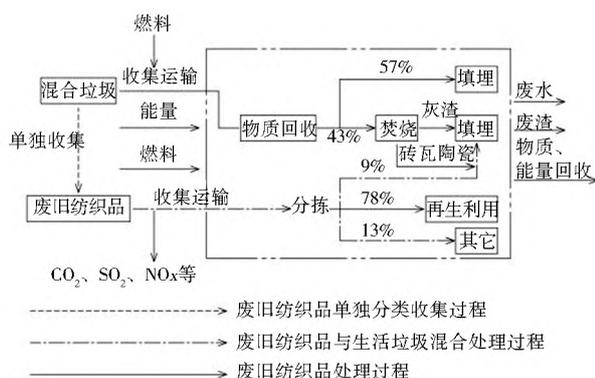


图 4 深圳市生活垃圾处理 LCA 边界
Fig. 4 LCA system boundary of Shenzhen municipal solid waste disposal

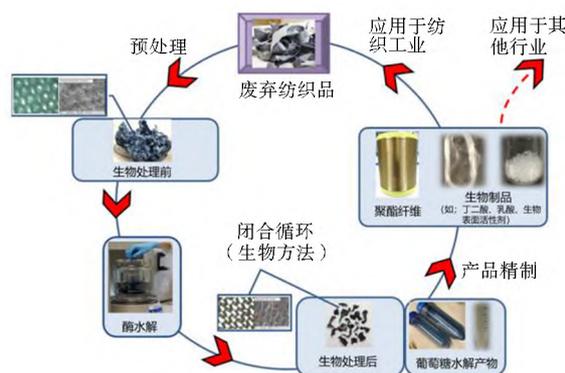


图 5 棉/聚酯废纺生物循环回收技术的工艺流程
Fig. 5 Process flow of the bio-recycling method for cotton/polyester waste spinning

LCA 工作在纺织行业已广泛用于科学研究、企业实际应用以及城市环境治理等方面, 发展前景广阔. 在工业技术层面, 借助于专业建模软件与数据库的开发, LCA 可核算纺织产品从棉花种植 (或石油开采、动物养殖) 直至废弃或回收循环^[39] 各生命周期阶段的环境负荷, 为技术开发者提供数据支持, 进而识别改进重点、优化工艺流程. 在产品消费层面, 碳足迹和碳标签可以为消费者提供欲购买产品的深层信息, 方便消费者选择更环保的消费模式, 推动全社会走向绿色低碳. 此外, 中国作为世界上最大的纺织产品生产国和消费国, 纺织品的 LCA 研究对国内温室气体的排放管理、低碳信息交流和相关国际贸易谈判等均具有重要意义.

2.2 制革行业

我国制革工业生产的皮革占世界总产量的 1/4, 是我国轻工业中的重要组成部分. 将 LCA 应用于制革行业, 可对比不同生产工艺的环境负荷、分析造成不同环境影响的潜在因素并识别制革过程中的重点改进环节. 丁绍兰、单晨等^[40-42] 曾对浙江某 PU 革企业以及山东某牛皮革企业进行生命周期清单分析, 并基于 SimaPro 软件中的 Eco-indicator 99 模型完成了 PU 革与牛皮革的 LCA 对比研究, 结果表明虽然 PU 革在酸化指标、富营养化指标以及矿石资源消耗指标等方面均低于牛皮革, 但就总体环境

影响而言牛皮革却优于PU革,由此可见在进行LCA对比研究时应尽可能全面的考虑环境影响指标类型。

皮革生产过程涉及使用大量的水和化学药品,李玉红等^[43]将皮革生产阶段的6个主要生产环节以及污水处理过程纳入系统边界(图6),并进行了数据归一化与敏感性分析,结果表明铬鞣剂在潜在的环境影响中起主导作用,并且间接导致了鞣制和复鞣两个生产环节的环境影响占总环境影响的65%以上。四川大学袁琳琳等^[44]曾在eFootprint在线平台对铬鞣黄牛革进行建模分析,同样提出了应减少铬鞣剂使用的建议,并在此基础上考虑采用铝-铝-钛鞣工艺^[45]替换铬鞣工艺,结果

表明采用替换后的无铬技术在全球变暖潜势、酸化指标、初级能源消耗指标等方面均有明显下降。国外学者也同样认为应减少或替换^[46-47]皮革鞣制过程中铬鞣剂的使用,如Mahdi等^[48]通过SimaPro建模工具对铝鞣、植鞣以及植物/铝组合鞣制3种工艺进行了环境影响评价,并参考Eco-indicators 99方法对比研究了不同情景下10余种环境影响指标,结果表明植物鞣制工艺比其他两种工艺减少20%~50%的环境影响。类似的LCA研究与传统铬鞣技术对比的还有改性戊二醛鞣工艺^[49-50]、氧化海藻酸钠(OSA)鞣制工艺^[51]等,均展现出显著的节能减排效果。尽管人们越来越重视无铬皮革的生产,但由于缺乏能够提供相同质量皮革的替代品,世界上80%~90%的制革厂仍然在生产湿铬鞣皮革。基于此,有国外学者提出应采用高效绿色的回收工艺对含铬物料进行循环再利用^[52],如采用化学混凝、碱沉淀和硫酸溶解等方法对制革废水中的铬进行回收,均可实现降低铬鞣皮革生命周期的环境负荷。

在绿色工艺改进方面,我国也曾有学者^[53]提出将皮革生产过程中脱灰阶段所使用的硫酸铵替换为甘氨酸,并进行环境影响评价。结果表明选择无铵脱灰剂可以大幅减少制革废水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染和脱灰剂生产过程造成的环境影响,主要原因在于新型甘氨酸的使用为制革废水引入了额外的碳源,使废水中总有机碳(TOC)与总氮(TN)的含量与比例为好氧生物降解污水中的有机物提供更适宜的环境,经过好氧生物处理24h后,与使用硫酸铵脱灰工艺相比,甘氨酸脱灰工艺产生的制革废水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TOC以及TN浓度均有明显下降。此外,为减少制革过程中的环境影响,降低其他高污染化学品的使用也很有必要,如在牛毛去除环节中以酶促脱毛工艺代替化学脱毛工艺^[54]、在皮革脱水环节以新型连续处理系统代替传统滚筒脱水系统^[55]等,均可实现可观的环境效益。

LCA也被用于研究产业共生的环境效益。意大利托斯卡纳大区是欧洲著名的牛皮皮革原料供应地,Daddi等^[56]曾针对该地区皮革企业的产业共生集群进行LCA案例分析,案例系统边界定义为从动物饲养直至皮革成品出厂,调查了制革、污水处理、污泥回收、铬回收、毛废料回收等各环节的实景数据。基于此,核算并对比了包括“已实施产业共生(情景1)”、“无或较少产业共生(情景2)”等共4种情景的环境效益(表3),结果表明在全球变暖潜势方面,情景1比情景2改善了将近22%,是实现最佳环境效益的指标类型,即采用产业共生模式每生产 1 m^2 皮革将减少4.3 kg的二氧化碳排放当量。此外,在情景1的基础上,该团队还考察了从共生模式的污水处理单元中循环利用20%废水和循环利用40%废水2种情景的环境影响,发现随着废水循环利用率的提高并没有实现更理想的环境效益,这说明对水足迹影响的主要因素或环节大概率存在于皮革生命周期的上游过程。

LCA可用于判断皮革生产过程中造成环境影响的主要因素,也可基于皮革产品的全生命周期数据识别重点改进环节。虽然LCA在制革工业中的研究与应用稍晚于其他行业,但在皮革全产业链中的各个阶段均有学者在进行生命周期相关研究,包括动物饲养屠宰、脱灰、水洗、鞣制、染色、废弃

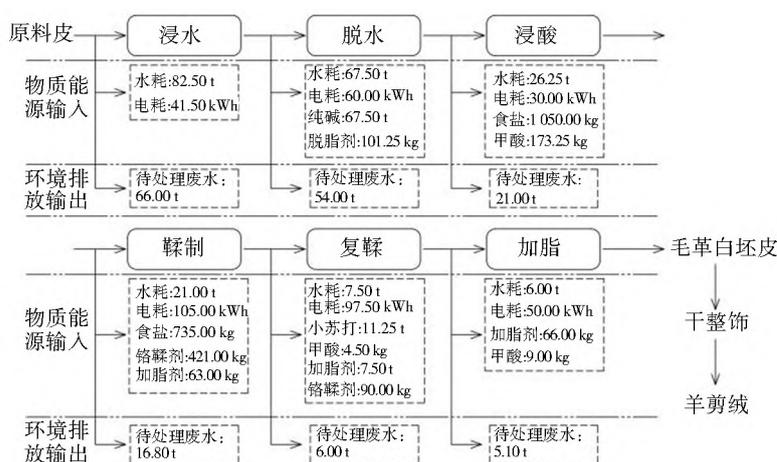


图6 皮革加工过程的LCA系统边界

Fig. 6 LCA system boundary of leather processing

物循环回收以及地区的产业共生等等,已为该行业的节能减排积累了大量的实用数据,对行业政策制定者、技术开发者以及从事 LCA 研究的相关人员均具有很高的参考价值.且随着 2018 年 4 月份欧盟皮革环境足迹法规的正式颁布,LCA 方法已成为皮革行业环境影响评价最正式、标准的方法之一^[57],正在被国内外越来越多的学者接受与认可.

表 3 托斯卡纳大区制革企业情景 1 对比于情景 2 的环境效益

Tab. 3 Comparison of environmental benefits between Scenario 1 and Scenario 2 in Tuscan tanneries

环境影响指标	指标单位	功能单位: 1 m ² 成品皮革		环境负荷降低比例/% (情景 1-情景 2)/情景 2
		情景 1	情景 2	
全球变暖潜势	kg CO ₂ eq.	15.34	19.64	-21.87
臭氧消耗指标	kg CFC-11 eq.	9.32E-06	9.46E-06	-1.48
非致癌人体毒性指标	CTUh	9.40E-06	9.67E-06	-1.48
致癌人体毒性指标	CTUh	6.147E-06	6.61E-06	-7.00
颗粒粉尘指标	kg PM2.5 eq.	0.012 1	0.014 3	-15.38
电离辐射指标	kBq U235 eq.	0.846	0.941	-10.10
光化学臭氧生成指标	kg NMVOC eq.	0.060 92	0.070 72	-13.86
酸化效应	molc H ⁺ eq.	0.190 02	0.215 17	-11.69
陆地富营养化	molc N eq.	0.383 06	0.470 14	-18.52
淡水富营养化	kg P eq.	0.001 60	0.001 82	-12.09
海洋富营养化	kg N eq.	0.046 86	0.050 14	-6.54
淡水生态毒性	CTUe	85.11	92.17	-7.66
土地利用指标	kg C deficit	132.57	138.97	-4.61
水资源消耗	m ³ water eq.	0.808 87	0.823 29	-1.75
矿产、化石和稀土资源消耗	kg Sb eq.	0.018 08	0.018 37	-1.58

2.3 其他轻工行业

除纺织行业及皮革行业,LCA 也广泛应用于包装材料、绿色建材等其他轻工行业.随着我国快递业的蓬勃发展,快递包装废料的处理过程是否低碳环保同样值得重点关注^[58].来源于生物质的聚乳酸(PLA)作为一种新型环保材料,废弃后可完全降解且不会对环境造成污染,史玉等^[59]以 PLA 快递包装为研究对象,将废弃包装的处理过程按填埋、焚烧、回收的不同比例组合分为 5 个情景,结果表明“焚烧 47%,填埋 13%,回收 40%”的处置情景所产生的环境负荷最低,也有国外学者针对塑料固体废弃物的处理过程进行过类似的 LCA 研究^[60].孙丹妮等^[61]使用 e-Footprint 平台对牛皮淋膜包装袋与聚乙烯包装袋进行了生命周期对比研究,并评估了指标数据的不确定度和灵敏度,由分析结果可知,虽然牛皮淋膜包装袋对比聚乙烯包装袋降低了将近 80%的二氧化碳排放当量,但在水足迹与一次能源的使用方面却远高于牛皮淋膜包装袋,为进一步降低包装材料的环境负荷,生产企业可考虑提高废水的回收利用率并尽量使用清洁能源.此外,基于 LCA 方法的环境影响评价在石油基^[62]、纸塑铝^[63]、淀粉基^[64]等材料制成的包装产品中都有应用,在包装材料生产企业的绿色管理、绿色制造等领域也有涉及^[65].

在绿色建材方面,陶明等^[66]曾依托来源于实际生产企业的实景数据对生态凝胶产品进行生命周期评估,对指标结果应用了基于蒙特卡罗方法的特征化中点分析与归一化中点分析,进而核算出分析结果的不确定性以及不同环境影响类型的物质贡献率,而后又与普通硅酸盐水泥产品进行了 LCA 对比研究,结果表明生态凝胶产品在碳足迹以及生态毒性指标均实现了大幅下降.龚健冲等^[67]基于 LCA 方法建立了 3 种墙体保温材料的能耗计算模型,并通过 eFootprint 平台对清单数据进行了灵敏度分析,识别出生产过程中的重点改进环节以及不同变量对能耗回收期的影响.刘洪涛等^[68]曾基于“投入产出-生命周期模型”综合分析了透水铺装路面的环境影响,分析结果表明:与普通路面对比,透水铺装路面在建设过程中会排放更多的温室气体,但由于该路面在运营阶段具有雨水收集功能,每

年会减排二氧化碳 300 kg 以上, 故长远来看将具有很高的环境效益.

在废弃材料的高值化利用方面, Shen 等^[69]评估了废弃 PET 瓶回收循环生产再生纤维的环境影响, 考虑到回收物在生命周期中的特殊性质, 在评价过程中探讨并使用了“cut-off”规则、“系统扩展”以及“废物估价”3种分配方法. 图7为该研究基于“cut-off”规则的“机械回收”“半机械回收”“低聚物回收”“单体回收”4种回收再生方式与原生纤维生产过程的 LCA 分析结果, 由统计图可知几种回收方式各有优劣, 但大部分均低于原生 PET 纤维的环境影响, 可考虑针对回收材料的性质特点对不同回收方法进行整合. 来源于冶炼厂的矿渣废弃物可作为多种建材产品的原料, 资源化价值高. 宋小龙等^[70]分析了由回收炼铁炉渣生产的新型水泥对比于传统硅酸盐水泥的环境效益, 建模所用的背景数据来源于 GaBi 数据库以及中国能源生产基础数据库. 由 GaBi 建模结果可知新型水泥节能减排效果显著. 此外, 生命周期评估在塑料垃圾管控^[71]、材料降解^[72]、海洋废弃物资源化利用^[73]等领域也都有应用.

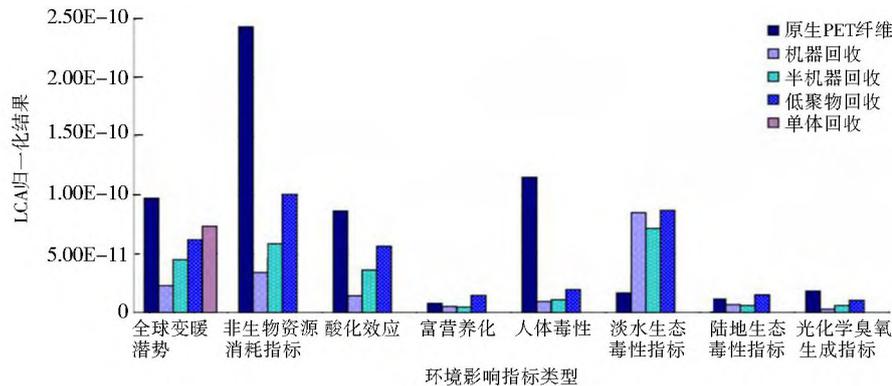


图7 采用不同回收技术的 PET 纤维 LCA 归一化结果

Fig. 7 Normalized LCA results of PET fibers in different reuse systems

3 总结与展望

LCA 可以帮助研究人员在进行绿色工艺开发以及环境影响评价过程中用系统全面的量化分析代替主观片面的定性判断. 作为系统、全面、科学的环境影响分析方法, LCA 在不同工艺方案的对比评价、环境效益核算以及废弃物的循环再生研究等方面均得到了广泛的认可与应用. 就某一类产品或生产技术而言, LCA 的基础分析结果包括但不限于全球变暖潜势 (GWP)、化石能源资源耗竭当量 (ADP)、酸化效应 (AP)、光化学臭氧生成当量 (POCP)、人体毒性 (HTP) 等环境影响指标. 基于此可以对同一产品在不同生产技术下的环境效益进行核算, 为选择更低碳绿色的工艺技术提供数据支持, 也可用于分析不同生产原料的环境影响贡献率, 识别发生资源消耗与环境污染的重点环节, 从而为技术开发者提供节能减排的改进思路. 此外, 人类的发展需要维持庞大的生产与消费规模, 也必然会造成负面的资源环境影响, 而资源环境效率问题与各个行业决策者的决定息息相关, LCA 可以为这些决策者提供科学的评价方法以及必要的参考依据.

从国内外轻工产业的 LCA 发展来看, 大部分学者都认为 LCA 的方法框架是科学的、合理的. 为进一步提高生命周期评估数据的精确性和结论的可靠性, 在 LCA 的实际操作层面可以尝试从以下几个方向进行考虑: LCA 可结合技术可行性分析与经济可行性分析, 基于环境效益、产品质量与经济效益 3 个角度解决问题, 从而提出更全面、更有建设性的评估结论或技术改进建议; 为提高背景数据与实际生产环节的适配度, 数据库开发者应与实际生产单位开展长期合作, 不断更新完善背景数据库, 并提高生产企业在 LCA 基础数据提供方面的参与度, 以消除软件数据库中个别物料数据在空间上或时间上的限制; 各家 LCA 体系数据质量评估方法不尽相同, 应建立科学统一的 LCA 数据质量定义与数据质量评估方法, 进而提高 LCA 数据的可信度. 此外, 为促进形成绿色消费模式, 应提高消费者对产品碳足迹、水足迹等指标以及产品潜在环境影响的认知度.

生命周期评估的广泛开展促进全社会走向低碳绿色,在推动我国实现节能减排目标的进程中发挥着重要作用,LCA方法的不断成熟及其普遍应用,也是人类可持续发展工作不断精细化、专业化的必然趋势。

参考文献:

- [1] 兰梓睿,孙振清. 考虑碳排放的中国轻工产业绿色生产率及影响因素研究: 基于轻工业16个细分行业面板数据[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5): 58-68.
- [2] CURRAN M A. Broad-based environmental life cycle assessment [J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(3): 430-436.
- [3] LIANG S, XU M, ZHANG T. Life cycle assessment of biodiesel production in China [J]. Bioresource Technology, 2013, 129: 72-77.
- [4] 惠婧璇,万里扬. 生命周期评价方法及应用于我国可再生能源领域研究进展 [J]. 中国能源, 2020, 42(3): 42-47.
- [5] 宋小龙,徐成,杨建新,等. 工业固体废物生命周期管理方法及案例分析 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 1051-1056.
- [6] 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.
- [7] 赵若楠,董莉,白璐,等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751-2757.
- [8] FINKBEINER M, INABA A, TAN R, et al. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044 [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2): 80-85.
- [9] 邓南圣,王小兵. 生命周期评价 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [10] FINKBEINER M. Carbon footprinting-opportunities and threats [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(2): 91-94.
- [11] 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.
- [12] 龚先政,聂祚仁,王志宏,等. 中国材料生命周期分析数据库开发及应用 [J]. 中国材料进展, 2011, 30(8): 1-7.
- [13] 刘夏璐,王洪涛,陈建,等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [14] SILVA D, NUNES A O, da Silva Moris A, et al. How important is the LCA software tool you choose comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto [C] //Proceedings of the VII Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica, Medellín, Colombia, 2017: 10-15.
- [15] HERRMANN I T, MOLTESEN A. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? a comparative assessment of SimaPro and GaBi [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 86: 163-169.
- [16] 黄娜,王洪涛,范辞冬,等. 基于不确定度和敏感度分析的LCA数据质量评估与控制方法 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1529-1536.
- [17] BAJDUR W M, HENCLIK A, SKOWRON-GRABOWSKA B, et al. LCA application in the assessment of new technologies of industrial effluents treatment [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(3): 1058-1066.
- [18] 郑秀君,胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展 [J]. 科技进步与对策, 2013, 30(6): 155-160.
- [19] 王赛赛,吴雄英,丁雪梅. 三种LCA核算软件对印花布碳足迹核算的比较 [J]. 印染, 2014, 40(18): 41-44.
- [20] SILVA D, NUNES A O, PIEKARSKI C M, et al. Why using different life cycle assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause - effect analysis of the problem [J]. Sustainable Production and Consumption, 2019, 20: 304-315.
- [21] 赵年花,周翔,董锋. 涤纶纺织品的碳足迹评估 [J]. 印染, 2012, 38(14): 42-45.
- [22] 李戎,吴丹丹,蒋红,等. 碳足迹及其在染整加工中的测算 [J]. 印染, 2011, 37(18): 40-43.
- [23] VELDEN N M, PATEL M K, VOGTLÄNDER J G. LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(2): 331-356.

- [24] YAN Y, WANG C, DING D, et al. Industrial carbon footprint of several typical Chinese textile fabrics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (3): 119-125.
- [25] 李一, 王君涛, 王来力. 牛仔裤工业碳足迹核算与评价示范 [J]. *现代纺织技术*, 2017, 25 (6): 58-61.
- [26] 王晓蓬, 王君涛, 李一. 基于 PAS 2395 的纺织产品碳足迹核算与评价 [J]. *现代纺织技术*, 2018, 26 (3): 44-46.
- [27] 吴猛. 基于生命周期的纺织服装产品碳足迹评价 [J]. *纺织导报*, 2018 (6): 26-28.
- [28] 王洋, 王小雷, 陶亚奇. 基于 LCA 的服装低碳化对策 [J]. *纺织导报*, 2019 (1): 19-22.
- [29] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43 (11): 4098-4104.
- [30] 崔宁. 轮胎用涤纶帘子布的生命周期评价 [J]. *合成纤维工业*, 2021, 44 (6): 40-45.
- [31] 刘书轶, 朱紫嫒, 邱笑笑, 等. 丝绸产品生命周期环境表现研究进展 [J]. *丝绸*, 2021, 58 (11): 5-9.
- [32] SANDIN G, PETERS G M, SVANSTRÖM M. Moving down the cause-effect chain of water and land use impacts: an LCA case study of textile fibres [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 73: 104-113.
- [33] LEVI'S. The life cycle understanding the environmental impact of a pair of Levi's 501 jeans [R/OL]. (2015-03-12). <http://levistrauss.com/wp-content/uploads/2015/03/Full-LCA-Results-Deck-FINAL.pdf>. 2015.
- [34] 汪少朋, 吴宝宅, 何洲. 废旧纺织品回收与资源化再生利用技术进展 [J]. *纺织学报*, 2021, 42 (8): 34-40.
- [35] 郭燕. 废旧服装处置方式碳足迹比较 [J]. *棉纺织技术*, 2014, 42 (1): 78-81.
- [36] 施乐荣, 刘荣杰, 观梦韵, 等. 基于垃圾分类的废旧纺织品的单独回收对深圳市生活垃圾处理的碳足迹影响分析 [J]. *环境卫生工程*, 2018, 26 (2): 4-8.
- [37] ZAMANI B, SVANSTRÖM M, PETERS G, et al. A carbon footprint of textile recycling: a case study in Sweden [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19 (4): 676-687.
- [38] SUBRAMANIAN K, CHOPRA S S, CAKIN E, et al. Environmental life cycle assessment of textile bio-recycling - valorizing cotton-polyester textile waste to pet fiber and glucose syrup [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 161: 104989.
- [39] FIDAN F, AYDOAN E K, UZAL N. An integrated life cycle assessment approach for denim fabric production using recycled cotton fibers and combined heat and power plant [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 287 (107/115): 125439.
- [40] 丁绍兰, 陈鹏. 山东某牛皮制革厂水场生命周期清单 [J]. *中国皮革*, 2008, 37 (23): 6-10.
- [41] 丁绍兰, 单晨. 浙江某合成革企业生命周期清单研究 [J]. *中国皮革*, 2011, 40 (1): 9-11.
- [42] 单晨, 丁绍兰. 牛皮革与 PU 革的生命周期评价比较 [J]. *西部皮革*, 2011, 33 (6): 12-15.
- [43] 李玉红, 廖学品, 王安, 等. 基于 LCA 方法对毛皮加工过程的环境影响评价 [J]. *皮革科学与工程*, 2020, 30 (2): 6-11.
- [44] 袁琳琳, 姚庆达, 但年华, 等. 铬鞣黄牛革全生命周期评价 [J]. *皮革科学与工程*, 2021, 31 (4): 11-16.
- [45] 袁琳琳, 姚庆达, 但年华, 等. 铬-铝-钛鞣黄牛革全生命周期评价 [J]. *中国皮革*, 2022, 51 (1): 7-13.
- [46] SHI J, PUIG R, SANG J, et al. A comprehensive evaluation of physical and environmental performances for wet-white leather manufacture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 1512-1519.
- [47] BAQUERO G, SOROLLA S, CUADROS R, et al. Analysis of the environmental impacts of waterproofing versus conventional vegetable tanning process-A life cycle analysis study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 325: 129344.
- [48] MAHDI S, MESSAOUD-BOUREGHDA M Z, AKSAS H. Comparative study of environmental impact of three-leather process production by life cycle analysis [J]. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2021, 28 (3): 305-318.
- [49] 徐晓颖, 石佳博, 王坤余. 基于 LCA 法对比传统铬鞣工艺和改性戊二醛鞣工艺 [J]. *皮革科学与工程*, 2015, 25 (1): 5-12.
- [50] XU X, BAQUERO G, PUIG R, et al. Carbon footprint and toxicity indicators of alternative chromium free tanning in China [J]. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2015, 110 (5): 130-137.
- [51] YU Y, LIN Y, ZENG Y, et al. Life cycle assessment for chrome tanning, chrome-free metal tanning, and metal-free tanning systems [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9 (19): 6720-6731.
- [52] TASCA A L, PUCCINI M. Leather tanning: life cycle assessment of retanning, fatliquoring and dyeing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 720-729.

- [53] LEI C, LIN Y, ZENG Y, et al. A cleaner deliming technology with glycine for ammonia-nitrogen reduction in leather manufacture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245: 118900.
- [54] CATALÁN E, KOMILIS D, SÁNCHEZ A. A life cycle assessment on the dehairing of rawhides: chemical treatment versus enzymatic recovery through solid state fermentation [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2019, 23 (2): 361-373.
- [55] BAQUERO G, SOROLLA S, OLLÉ L, et al. Environmental assessment of dehydration processes for bovine hides [J]. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2017, 112 (3): 102-108.
- [56] DADDI T, NUCCI B, IRALDO F. Using Life Cycle Assessment (LCA) to measure the environmental benefits of industrial symbiosis in an industrial cluster of SMEs [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 157-164.
- [57] 祝德义, 鹿文慧, 靳丽强, 等. 全生命周期评价 (LCA) 在我国制革行业中的应用——研究进展与存在问题 [J]. *中国皮革*, 2021, 50 (11): 102-106.
- [58] KANG P, SONG G, XU M, et al. Low-carbon pathways for the booming express delivery sector in China [J]. *Nature Communications*, 2021, 12 (1): 1-8.
- [59] 史玉, 徐凌, 陈郁, 等. 基于 LCA 的聚乳酸快递包装环境友好性评价 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40 (12): 5475-5483.
- [60] KHOO H H. LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 145: 67-77.
- [61] 孙丹妮, 霍李江, 赵昱. 书籍快递包装袋生产工艺的生命周期评价 [J]. *数字印刷*, 2021 (6): 51-56.
- [62] 谢明辉, 李丽, 黄泽春, 等. 食用油聚酯包装的生命周期评价 [J]. *环境科学研究*, 2010, 23 (3): 288-292.
- [63] 王志慧, 王洪涛, 黄娜, 等. 纸塑铝复合包装材料的碳足迹评价与认证 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25 (6): 712-716.
- [64] 王艳丽, 李玉坤, 支朝晖, 等. 淀粉基食品包装材料的生命周期评价 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21 (12): 277-282.
- [65] 孙俊军, 鄂玉萍, 田亚利. 基于产品全生命周期的纸包装绿色生态发展模式 [J]. *包装工程*, 2022, 43 (1): 259-265.
- [66] 陶明, 聂克蜜, 成诗冰, 等. 基于 LCA 方法的生态胶凝材料生产环境影响分析 [J/OL]. *安全与环境学报*, (2021-09-08). <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2021.0925>.
- [67] 龚健冲, 杨雪玲. 基于 LCA 理论的保温材料对建筑能耗及回收期的影响分析 [J]. *新型建筑材料*, 2015, 42 (6): 32-35.
- [68] 刘洪涛, 李艳芳, 石时. 透水性路面与普通路面的生命周期评价 [J]. *城市问题*, 2017 (5): 52-57.
- [69] SHEN L, WORRELL E, PATEL M K. Open-loop recycling: a LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling [J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2011, 55 (1): 34-52.
- [70] 宋小龙, 杨建新, 刘晶茹. 高炉渣资源化生产绿色建材的环境效益评估: 基于生命周期的视角 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22 (4): 51-55.
- [71] 申宸昊, 邓义祥, 张嘉戎, 等. 我国塑料污染生命周期管理分析与建议 [J]. *环境科学研究*, 2021, 34 (8): 2026-2034.
- [72] BISHOP G, STYLES D, LENS P. Environmental performance comparison of bioplastics and petrochemical plastics: a review of life cycle assessment (LCA) methodological decisions [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 168 (18): 105451.
- [73] 李云霞, 任世伟, 刘翼, 等. 贝壳粉壁材的生命周期评价研究 [J]. *新型建筑材料*, 2020, 47 (6): 88-91.

(责任编辑: 陈力勤)