

一次性纸杯生产过程的环境影响评价

张卓然, 林勤保, 肖梓扬

(暨南大学 包装工程研究所, 广东 珠海 519070)

摘要: **目的** 以聚乙烯 (PE) 淋膜纸杯、聚乳酸 (PLA) 淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯 3 种一次性纸杯为研究对象, 评估和比较不同纸杯对人体健康和环境的影响, 为纸杯企业与行业提供参考。**方法** 采用生命周期评价 (LCA) 方法, 使用 eFootprint 软件进行一次性纸杯生产阶段的生命周期评价, 包括目标与范围确定、清单分析、生命周期影响评价及解释、数据质量评估 4 个部分。**结果** 在纸杯用纸的定量均为 210 g/m^2 和淋膜 (涂层) 层数均为一层的情况下, PE 淋膜纸杯、PLA 淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯生产的分别排放 1 839、2 077、1 826 kg CO_2 eq. 的温室气体, 8.88、10.75、8.63 kg SO_2 eq. 影响酸化的气体和物质, 2.93、3.23 和 2.93 kg $(\text{PO}_4)^{3-}$ eq. 影响富营养化的物质。**结论** 综合来看, 丙烯酸聚合物涂层纸杯生产过程对环境更为友好。

关键词: 生命周期评价; 环境影响; 一次性纸杯

中图分类号: TB484; TS767 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)13-0275-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.035

Assessment of Environmental Impact during Production of Disposable Paper Cup

ZHANG Zhuo-ran, LIN Qin-bao, XIAO Zi-yang

(Packaging Engineering Institute, Jinan University, Guangdong Zhuhai 519070, China)

ABSTRACT: The work aims to assess and compare the effects of different paper cups on human health and environment with three kinds of paper cups, including PLA filmed, PE filmed and acrylic polymer coated ones, as object of study, so as to provide references for paper cup enterprises and industry. The live cycle assessment of paper cups, including objective/scope determination, check list analysis, life cycle impact assessment/interpretation, and data quality assessment, was conducted with LCA method and software eFootprint. When the grammage of the paper cup was up to 210 g/m^2 and only one layer was filmed or coated, the paper cups filmed or coated with PE, PLA and acrylic polymer emitted 1 839, 2 077 and 1 826 kg CO_2 eq. of greenhouse gases, 8.88, 10.75 and 8.63 kg SO_2 eq. of gases and substances affecting acidification, and 2.93, 3.23 and 2.93 kg $(\text{PO}_4)^{3-}$ eq. of substances affecting eutrophication, respectively. In general, the production process of acrylic polymer coated paper cups is more environmentally friendly.

KEY WORDS: life cycle assessment (LCA); environmental impact; disposable paper cup

一次性纸杯作为生活中的日常必需品, 在生活中的应用很广泛, 目前, 全球每年要使用 3 000 亿个一次性纸杯^[1]。一次性纸杯主要分为 3 个部分,

分别是杯底、杯身和表面涂覆的有机聚合物, 主要原材料为纸张和不同种类的聚合物, 一次性纸杯主要有淋膜纸杯和上蜡杯 2 种类型^[2-3]。目前我国尚未

收稿日期: 2021-11-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1603204); 珠海进出口公共技术服务平台产学研协同创新计划 (IETP202001007)

作者简介: 张卓然 (2000—), 男, 暨南大学本科生, 主攻食品包装安全。

通信作者: 林勤保 (1968—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品包装安全。

形成一次性纸杯的回收体系,如何有效准确地评价一次性纸杯对资源环境和人体健康的影响,是可持续发展包装领域的一个重大问题。聚乳酸淋膜纸杯又称为生物降解淋膜纸杯,可以依靠垃圾分类堆肥进行降解。涂层纸杯主要使用的是丙烯酸聚合物作为纸杯涂层,防水效果较好,且丙烯酸聚合物涂层纸杯也可以进行打浆回收,在环保上也比传统纸杯更有优势。

由于人们对环保和可持续发展越来越重视,作为一种评估环境影响的方法,生命周期评价(LCA)在世界和中国范围内越来越受到关注。这种评价方法常用于企业、行业、产品和服务的环境分析^[4-5],对企业改进其生产工艺和政府制定相应的环保政策都有着积极的意义^[6]。

目前国内外对纸杯生命周期评价的研究主要有聚乙烯涂层的冰淇淋杯的生命周期评价^[7],一次性纸杯碳排放的生命周期评价^[8],一次性塑料杯和一次性涂层纸杯的环境影响比较^[9]和可重复使用杯与一次性杯的生命周期影响比较^[10]。对聚乙烯(PE)淋膜纸杯、聚乳酸(PLA)淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯的环境影响比较,以及对同种纸杯不同生产工艺之间的环境影响比较还暂无文献研究。

1 纸杯生命周期评价标准与指标

GB/T 24040—2008 规定了生命周期评价要包括目标与范围确定、清单分析、生命周期影响评价和数据质量评估结果4个部分^[11]。

整个建模、结果计算、数据质量不确定度计算和累计贡献率计算都在亿科公司研发的生命周期评价软件 eFootprint 上进行,其采用了更多国内实际调查的供应链数据,有效地提高了数据的质量,并且 eFootprint 软件基于网络浏览器进行在线操作,无须下载终端,提高了工作的效率,降低了时间成本,其次除了 eFootprint 的公共基础数据库之外,用户还可以邀请供应商整合供应链环境数据,从而建立自有产品数据库。eFootprint 的主要工作流程是通过用户在线填写生产过程中消耗原材料或者能源等数据,经过软件的分析建模,最终输出产品的碳足迹、环境足迹等报告。

eFootprint 软件计算所用到的原料和能源(如 PE、

PLA、油墨、电能、水等)的环境排放数据均来自于 CLCD^[12]和 Ecoinvent 数据库。其中 CLCD 数据库又称中国生命周期基础数据库,是由四川大学和亿科环境公司共同开发建立的中国本土化的生命周期基础数据库,涵盖了中国的大宗能源和原材料的生命周期数据,并且内置了基于中国地区的归一化指标与权重因子,能为国内的 LCA 计算提供更为准确的数据。Ecoinvent 数据库是由瑞士 Ecoinvent 中心开发的商业数据库,它涵盖了世界多国常见原材料和能源的 LCA 数据清单,是目前使用最广泛的 LCA 数据库之一。

参照 eFootprint 的在线评估结果,文章将主要根据气候变化潜值(GWP)、酸化潜值(AP)、富营养化潜值(EP)、可吸入无机物(RI)和光化学臭氧合成潜值(POCP)这5个环境影响指标结果,从不同的维度评价比较3种纸杯的生产过程对环境的影响程度。

2 评价目标与清单分析

2.1 评价目标

2.1.1 研究对象

选取了 PLA 淋膜纸杯、PE 淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯3种纸杯(容量均为473 mL),其具体规格参数见表1。

2.1.2 系统边界

淋膜纸杯和涂层纸杯的生产过程类似,都要经过淋膜(涂层)、印刷、模切和黏合成型4个过程,再加上内包装和外包装这2个环节。生命周期评价的系统边界为从原料采集到完成生产阶段,不评价使用阶段和回收处理阶段的输入输出影响,基于纸杯的生产工艺流程确定的具体系统边界,即从纸浆造纸和采购 PLA/PE 粒子(或丙烯酸聚合物)开始,到纸杯装入外包装纸箱结束。生产过程中排出的有机废气均有组织排放,废水排放到污水处理厂处理,一般工业固废中的废纸由相关公司回收利用,废包装桶由供方回收利用,污泥则委托相关单位集中处理。纸杯生产在同一厂房进行,运输、储存产生的成本和环境影响可忽略。详细的系统边界流程见图1。

表1 3种纸杯的生产规格

Tab.1 Production specifications of three kinds of paper cups

评价对象	淋膜(涂层)方式	淋膜(涂层)定量/(g·m ⁻²)	纸杯纸定量/(g·m ⁻²)	单杯质量/g
PE 淋膜纸杯	单淋膜	15	210	8.52
PLA 淋膜纸杯	单淋膜	30	210	9.08
丙烯酸聚合物涂层纸杯	单涂层	10	210	8.26

2.2 清单分析及功能单位

生命周期清单分析指在所确定的范围内对产品系统生命周期过程中的输入(能源消耗)、输出(污染物排放)进行数据量化和分析^[13]。其中资源消耗、环境影响、结果对比数据与分析等都将以生产 10 万个纸杯作为单位,原因是纸杯的使用个为单位,固定

纸杯生产总质量无法均等地体现出纸杯的使用价值^[9],且定为 10 万个可减少数据过小产生的误差。根据 10 万个纸杯的生产实际情况,3 种纸杯生产数据的基本信息见表 2。在生产系统边界内,产品生产过程中的物耗和能耗的数据清单见表 3^[14],其中,PE 淋膜纸杯、PLA 淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯生产过程中的物耗和能耗数据均来自于国内某公司。

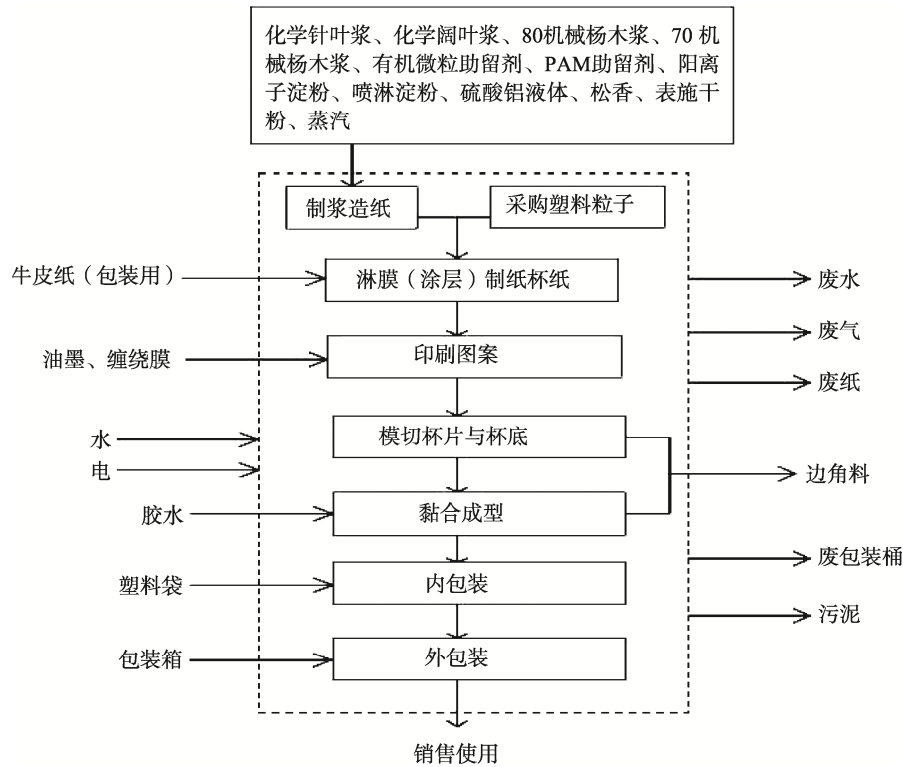


图 1 纸杯生产的系统边界
Fig.1 System boundary of production of paper cups

表 2 纸杯生产数据的基本信息
Tab.2 Basic production information of paper cups

过程名称	过程边界	主要原料	工艺设备	主要能源
淋膜(涂层)	将纸张和粒子生产成为淋膜(涂层)纸	PE(PLA、丙烯酸聚合物)粒子、纸杯原纸、纸箱	淋膜(涂层)机	电能
印刷	利用油墨将淋膜(涂层)纸进行印刷	油墨、缠绕膜、纸箱、淋膜(涂层)纸	印刷机	电能
模切杯片	将印刷好的纸杯纸模切成为杯片(杯盖和杯底)	印刷淋膜(涂层)纸、缠绕膜	模切机	电能
成型	将杯片制造成为纸杯	杯片	制杯机	电能
内包装	将纸杯进行内包装装袋	纸杯、包装袋、标签纸		
外包装	将纸杯进行外包装装箱	纸杯、纸箱、封箱胶带		

表 3 纸杯加工过程输入数据清单(以 10 万个纸杯为基准)
Tab.3 Input data in processing of paper cups (based on 100,000 paper cups)

纸杯类型	质量/kg										电能/(kW·h)
	纸杯原纸	PE	纸板	油墨	牛皮纸	缠绕膜	包装袋	标签纸	包装箱	封箱胶带	
PE 淋膜	1 240	89.5	8.5	10.6	8.5	2.2	22.9	0.5	10.1	0.9	1 051
PLA 淋膜	1 240	178.6	8.5	10.6	8.5	2.2	22.9	0.5	10.1	0.9	1 189
丙烯酸聚合物涂层	1 240	48.3	8.5	10.6	8.5	2.2	22.9	0.5	10.1	0.9	980

3 生命周期影响评价及解释

研究一个生产过程的生命周期对环境造成的潜在影响,生命周期影响评估结果是一个重要的参考^[15]。基于生命周期影响评价的结果及解释,不但可以供消费者购买产品时进行参考,也可以为生产厂家提供工艺改进建议,使其优化生产线达到环保节能的目的。

在生命周期评价模型的建立中,影响评价主要分为2个部分。首先是对PE淋膜纸杯、PLA淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯3种不同纸杯产品的环境影响进行比较;其次是对纸杯生产过程环境影响的累计贡献率进行分析。

3.1 不同产品对比

根据LCA模型的计算,5种环境影响指标见表4,3种纸杯的环境影响指标数值见图2,PE淋膜纸杯、PLA淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯生产过程环境影响的累计贡献率见图3。

1)从图2a可以看出在单淋膜(涂层)的工艺下气候变化潜值(GWP)的影响从大到小分别为PLA淋膜纸杯、PE淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯。影响GWP的主要参数是产生的二氧化碳当量。由于PLA淋膜纸杯比PE淋膜纸杯使用的粒子质量要大,所以其生产过程比PE淋膜纸杯的生产过程产生了更多的二氧化碳。通过结果的累计贡献分析可知,以PE淋膜纸杯为例,在工艺上的印刷用电,以及原料上的纸杯原纸、塑料粒子影响了整体的GWP。因此如果想要降低纸杯生产对气候变化的影响,降低纸杯原纸和塑料粒子的使用量是很有必要的。

2)从图2b可以看出,在酸化潜值(AP)指标中,PLA淋膜纸杯(10.75 kg SO₂ eq.)远高于其他2种纸杯。AP衡量的是酸性污染物对环境产生的酸化影响,造成PLA淋膜纸杯与另外几款纸杯差别如此大的原因在于PLA淋膜纸杯使用的PLA粒子在生产的过程中会产生乳酸,乳酸具有一定的酸性,会对酸化指标产生一定的贡献。

3)从图2c可以看出,3种纸杯的富营养化潜值都较为接近〔约为3 kg (PO₄)³⁻ eq.〕。根据结果的累计贡献分析可知,对富营养化影响较大的过程为淋膜过程,其累计贡献率达到了80%以上,主要影响物质为纸杯原纸,因此这3种使用原纸定量相同的纸杯在富营养化指标上的差距并没有很大。

4)3种纸杯对可吸入无机物(RI)指标的影响从大到小为PLA淋膜纸杯、PE淋膜纸杯、丙烯酸聚合物涂层纸杯。从累计贡献分析来看,影响RI最主要的因素为淋膜过程中塑料粒子的使用,另外印刷过程贡献率也较大。可以看出,使用聚乳酸进行生产排放的可吸入无机物是3种纸杯中最多的,因此想要降低可吸入无机物的排放量,要尽量减少有机塑料粒子的使用。

5)在光化学臭氧合成潜值(POCP)指标上,3款纸杯中差别并不是很大(约为4.0 kg Ethene eq.),这是因为主要影响光化学臭氧合成潜值的原材料为纸杯原纸,而3种纸杯使用纸杯原纸的定量是相同的,所以反映到指标上差别很小。

3.2 纸杯生产过程环境影响累计贡献率分析

从图3中可以看出,在气候变化潜值、酸化潜值、富营养化潜值、可吸入无机物和光化学臭氧合成潜值方面,淋膜(涂层)过程是造成环境影响的主要因素,这主要是因为淋膜(涂层)过程中使用的纸杯原纸和塑料粒子会对环境造成较大的污染。印刷过程对5项环境指标的贡献率也较大,这主要是因为印刷过程中使用了油墨且印刷耗电量较大。模切、成型和包装过程对环境影响的贡献率很小,3个过程累计只占10%左右,主要是因为耗电量较小且没有使用对环境影响较大的材料。

3.3 数据质量评估结果

数据不确定度评估是eFootprint中CLCD(中国生命周期基础数据库)中独有的功能,可以基于研究对象所在行业的实际生产数据对特征化环境影响指标进行不确定度分析,通过对比年份、地域、行业数据或企业数据等因素来评估数据的质量。

表4 5种环境影响指标介绍

Tab.4 Introduction for five environmental impact indicators

环境影响类型	指标介绍	主要影响物质	单位
全球变暖潜值(GWP)	温室气体排放指标	CO ₂ 、CH ₄ 、CH ₃ Br等	kg CO ₂ eq.
酸化潜值(AP)	衡量酸性污染物对环境产生的酸化影响	SO ₂ 、HCL、NO _x 、NH ⁴⁺ 等	kg SO ₂ eq.
水体富营养化潜值(EP)	排放物对环境产生的富营养化影响	PO ₄ ³⁻ 、NO _x 、NH ⁴⁺ N等	kg (PO ₄) ₃₋ eq.
可吸入无机物(RI)	衡量可吸入无机物对环境和人体健康的影响	PM10、PM2.5等	kg PM2.5 eq.
光化学臭氧合成潜值(POCP)	衡量碳氢化合物与氮氧化物在紫外线作用下发生光化学反应造成二次污染的影响	非甲烷总烃(NMHC)等	kg Ethene eq.

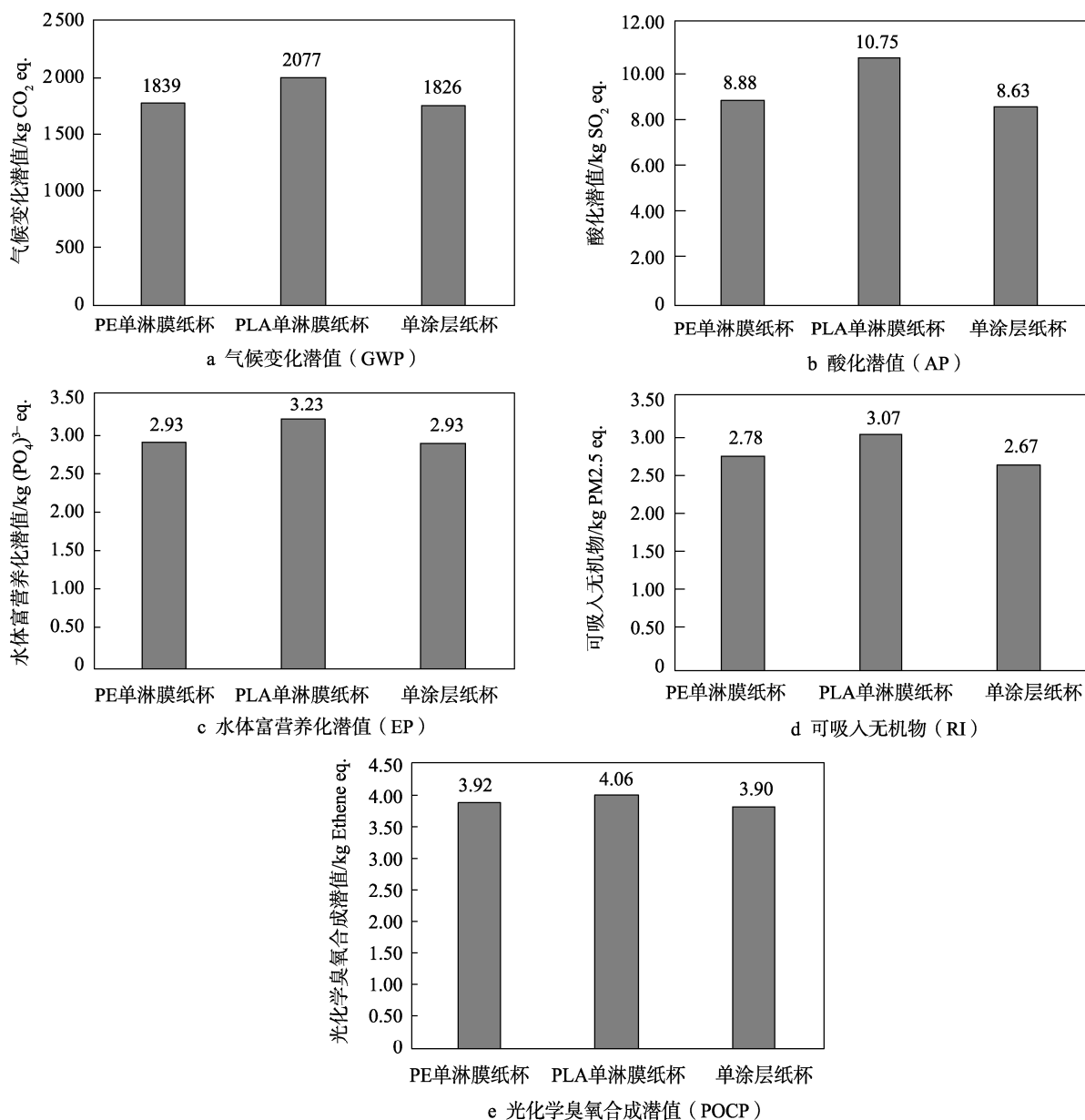


图 2 10 万个一次性纸杯生产过程的环境影响

Fig.2 Environmental impact during production of 100,000 disposable paper cups

基于 CLCD 质量评估方法, 使用 eFootprint 软件对模型中清单数据的不确定度进行了评估, 数据质量评估结果见表 5。

从表 5 可以看出, 结果的不确定度均在 5% 左右, 不确定度较小, 说明模型模拟的结果较为可靠。

4 工艺改进建议

大部分的环境影响主要源自纸杯生产过程中所消耗的电能, 除未计耗电的内包装与外包装环节, 剩余 4 个生产流程, 即淋膜 (涂层)、印刷、模切、成型皆需要消耗电能。如何减少电能的消耗和使用清洁能源也是一个重要的改进方向。首先需在保证纸杯产量与市场需求的同时, 优化生产线结构, 使用更为科学节能的机器, 最大化利用电能, 减少电能损耗; 其

次, 应逐渐减少排放大量温室气体和有害物质的火力发电在电网中的占比, 选用清洁能源, 如太阳能、风能、水能、核能等, 火力发电所排放的气体与物质更应加强监管, 必须经过处理再排放。

不同的生产工艺也会对环境指标产生影响, 尤其是塑料粒子定量的降低, 对减小 5 种环境指标都有着积极的影响。在实际的生产过程中要不断地改进生产的工艺, 尽量减少原材料, 尤其是塑料粒子的使用。

纸杯原纸的使用对环境的影响也是较大的, 在各项指标中都贡献较大。在实际的生产过程中主要有 2 个改进方向: 首先在保证消费者使用体验的基础上, 尽量使用定量较小的纸杯原纸; 其次要进一步完善对纸杯原纸的分离回收工艺, 对使用完成后的纸杯进行回收, 并用到其他非食品领域。

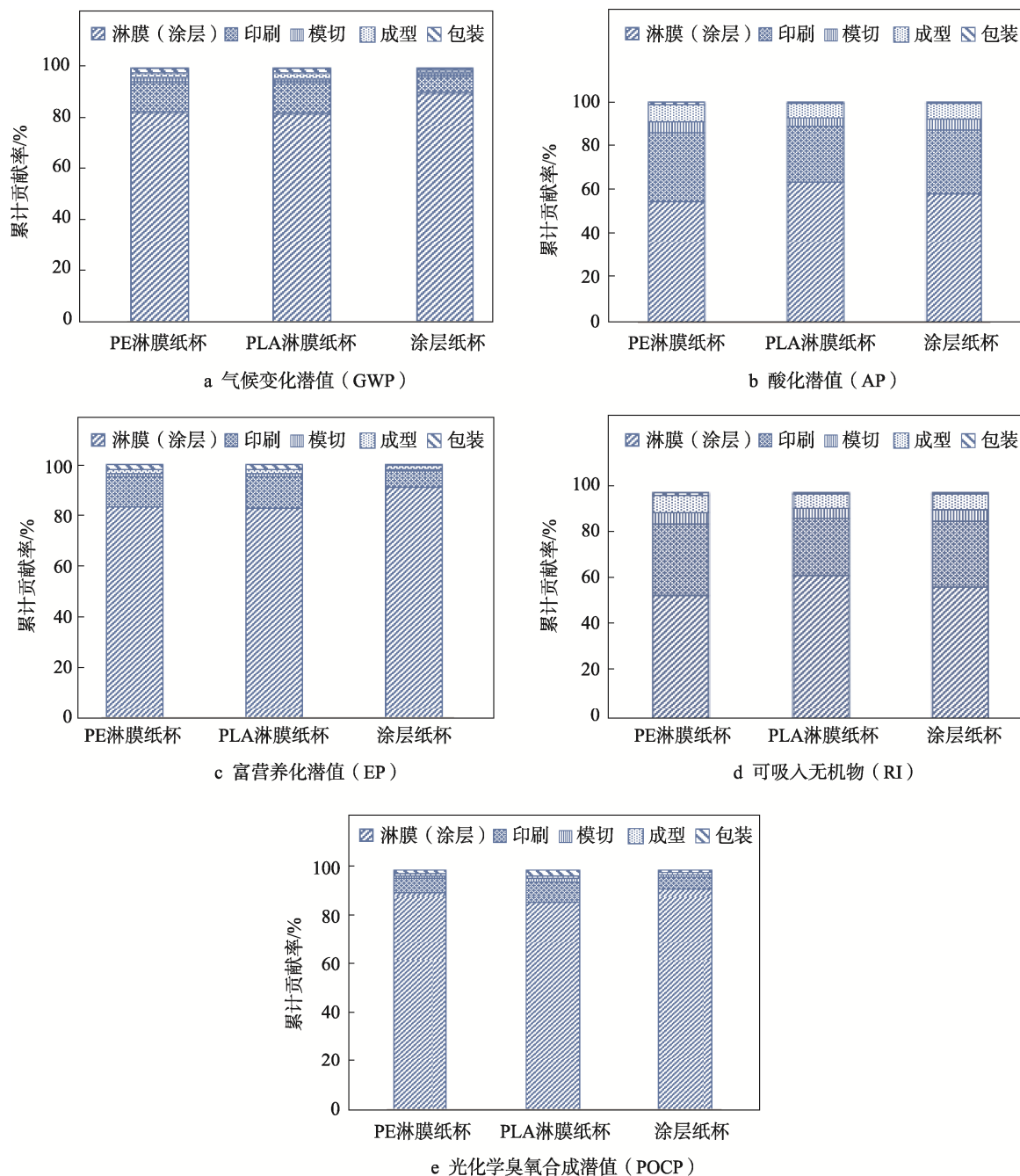


图3 纸杯生产过程环境影响的累计贡献率
Fig.3 Cumulative contribution of environmental impact during production process of paper cups

表5 数据质量评估结果
Tab.5 Assessment results of data quality

指标名称	PE 淋膜纸杯		PLA 淋膜纸杯		丙烯酸聚合物涂层纸杯	
	结果不确定度/%	结果上下限 (95%置信区间)	结果不确定度/%	结果上下限 (95%置信区间)	结果不确定度/%	结果上下限 (95%置信区间)
气候变化潜值	5.42	[1 939,1 739]	5.47	[2 190,1 963]	5.88	[1 933,1 719]
酸化潜值	4.49	[9.28,8.48]	4.89	[11.28,10.22]	4.76	[9.04,8.22]
富营养化潜值	5.80	[3.10,2.76]	4.77	[3.39,3.08]	5.45	[3.09,2.77]
可吸入无机物	4.33	[2.90,2.66]	4.53	[3.21,2.93]	4.86	[2.80,2.54]
光化学臭氧合成潜值	5.79	[4.15,3.69]	5.98	[4.30,3.81]	5.60	[4.12,3.68]

5 结语

基于生命周期评价方法, 分别对 PE 淋膜纸杯、PLA 淋膜纸杯和丙烯酸聚合物涂层纸杯的生产工艺进行了环境影响分析, 为目前市面上常见的 3 种纸杯对环境的影响和生产工艺的改进提供了参考, 具有实际应用价值。

研究结果表明, 丙烯酸聚合物涂层纸杯在生产过程中具有较好的环保优势, PLA 淋膜纸杯作为热门的可降解的环保材料纸杯, 并没有在生产阶段展现出比传统的 PE 淋膜纸杯较为明显的优势。如果进一步增加对纸杯的回收处理过程的评估, 即考虑全生命周期过程, 丙烯酸聚合物涂层纸杯因其可重复打浆利用, 环保优势非常明显。

如果可以进一步搜集到 3 种聚合物材料生产过程和纸杯回收过程的相应数据, 那么生命周期评价结果对行业的借鉴作用会更大。生产数据主要来源于个别合作企业, 假设能够搜集到多个厂家的数据进行综合的评估, 那生命周期评价结果将会更加具有说服力。

参考文献:

- [1] POTTING J, VAN DER HARST E. Facility Arrangements and the Environmental Performance of Disposable and Reusable Cups[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(8): 1143-1154.
- [2] LEE Tai ju, YOON C, RYU J Y. A New Potential Paper Resource; Recyclability of Paper Cups Coated with Water-Soluble Polyacrylate-Based Polymer[J]. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2017, 32(1): 155-161.
- [3] GB/T 27590—2011, 纸杯[S].
GB/T 27590—2011, Paper Cup[S].
- [4] KOUSEMAKER T M, JONKER G H, VAKIS A I. LCA Practices of Plastics and Their Recycling: A Critical Review[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3305.
- [5] GOLDEN O, BASHIR A, SANGHYUN K, et al. Status of Environmental Life Cycle Assessment (LCA): A Case Study of South Korea[J]. *Sustainability*, 2021, 13(11): 6234.
- [6] KHANDELWAL H, DHAR H, THALLA A K, et al. Application of Life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management: A Worldwide Critical Review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 630-654.
- [7] BUCCINO C, FERRARA C, MALVANO C, et al. LCA of an Ice Cream Cup of Polyethylene Coated Paper: How does the Choice of the End-of-Life Affect the Results?[J]. *Environ Technol*, 2019, 40(5): 584-593.
- [8] FOTEINIS S. How Small Daily Choices Play a Huge Role in Climate Change: The Disposable Paper Cup Environmental Bane[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255: 120294.
- [9] 闫宇飞. 一次性塑料水杯与涂层纸杯的生命周期评价与分析[J]. *环境科学与管理*, 2011, 36(6): 174-179.
YAN Yu-fei. Life Cycle Assessment and Analysis of Disposable Plastic Cups and Paper Cups[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(6): 174-179.
- [10] WOODS L, BAKSHI B R. Reusable vs Disposable Cups Revisited: Guidance in Life Cycle Comparisons Addressing Scenario, Model, and Parameter Uncertainties for the US Consumer[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(4): 931-940.
- [11] GB/T 24040—2008, 环境管理生命周期评价原则与框架[S].
GB/T 24040—2008, Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Frameworks[S].
- [12] 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.
LIU Xia-lu, WANG Hong-tao, CHEN Jian, et al. Method and Basic Model for Development of Chinese Reference Life Cycle Database[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [13] 王婧, 张旭, 黄志甲. 基于 LCA 的建材生产能耗及污染物排放清单分析[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(6): 149-153.
WANG Jing, ZHANG Xu, HUANG Zhi-jia. Life Cycle Assessment Energy Consumption and Pollutant Emission Inventory Analysis of Construction Materials Production[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(6): 149-153.
- [14] 林铭香, 林勤保, 马仕成, 等. 定制猫眼彩盒的生命周期评价分析[J]. *包装工程*, 2020, 41(21): 125-130.
LIN Ming-xiang, LIN Qin-bao, MA Shi-cheng, et al. Life Cycle Assessment on Customized Cat Eye Carton[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(21): 125-130.
- [15] 林铭香, 林勤保, 黄玮彬. 两种复合软管生产过程的环境影响评价[J]. *包装工程*, 2021, 42(3): 121-127.
LIN Ming-xiang, LIN Qin-bao, HUANG Wei-bin. Environmental Impact Assessment of Two Kinds of Laminate Tube in Production[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(3): 121-127.