

基于欧盟产品环境足迹方法的纸浆模塑眼镜盒 生命周期评价研究

程雁飞^{1,2}, 张暖¹, 杨青华^{1,3}, 林勤保^{1*}, 张志豪²

(1.暨南大学 包装工程研究所, 广东 珠海 519070; 2.裕同包装科技股份有限公司, 广东 深圳 518000;
3.知里科技(广东)有限公司, 广州 510000)

摘要: **目的** 通过量化分析以竹纤维和甘蔗纤维为原料的纸浆模塑眼镜盒的全生命周期环境影响, 识别其生产过程中的最相关生命周期阶段和过程, 并提出改进建议。**方法** 基于欧盟产品环境足迹方法, 利用 SimaPro 软件和 Ecoinvent 数据库对眼镜盒进行生命周期建模, 采用 EF 3.1 方法量化其潜在的环境足迹, 并进行生命周期解释和分析。**结果** 气候变化、化石资源利用、颗粒物、酸化和光化学臭氧形成是纸浆模塑眼镜盒生产过程中的最相关环境影响类别。生产 1 000 kg 纸浆模塑眼镜盒造成的气候变化影响为 6 164.25 kg CO₂ eq., 主要与浆板制造和制品成型过程中的电能、蒸汽能源消耗密切相关。采用清洁能源替代传统电能, 最多可减少生产过程中 80% 的温室气体排放。相较于完全焚烧、填埋, 废弃物回收后纸浆模塑眼镜盒的气候变化影响可降低 8.78%~20.11%。**结论** 减少生产过程中的电能消耗、加速清洁能源的转型和纸浆模塑废弃物回收体系的构建, 可减少其环境足迹, 促进纸浆模塑的可持续发展。

关键词: 纸浆模塑; 生命周期评价; SimaPro; 气候变化

中图分类号: TB489

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)03-0229-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.027

Life Cycle Assessment of Pulp Molding Eyeglass Cases Based on EU Product Environmental Footprint Method

CHENG Yanfei^{1,2}, ZHANG Nuan¹, YANG Qinghua^{1,3}, LIN Qinbao^{1*}, ZHANG Zhihao²

(1. Institute of Packaging Engineering, Jinan University, Guangdong Zhuhai 519070, China; 2. Yutong Packaging Technology Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China; 3. Zhili Technology (Guangdong) Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

ABSTRACT: The work aims to identify the most relevant life cycle stages and processes in the production process of the pulp molding eyeglass case made from bamboo and sugarcane fibers by quantifying the environmental impact of the whole life cycle and make suggestions for improvement. Based on the EU product environmental footprint method, SimaPro software and Ecoinvent database were used to model the life cycle of the eyeglass case, EF 3.1 method was employed to quantify the potential environmental footprint, and life cycle interpretation and analysis were conducted. Climate change, fossil resource utilization, particulate matter, acidification and photochemical ozone formation were the most relevant environmental effects in the production of the pulp molding eyeglass case. The result of climate change caused by the production of 1 000 kg pulp molding eyeglass case was 6 164.25 kg CO₂ eq., which was mainly related to the electricity and steam consumption in the pulp board manufacturing and product molding process. Replacing conventional electricity with clean energy could reduce greenhouse gas emissions by up to 80% during production.

收稿日期: 2024-08-31

基金项目: 暨南大学大学生创新创业训练计划支持项目 (CX24274); 珠海市产学研合作项目 (2220004003084)

*通信作者

Compared with complete incineration and landfilling, the climate change impact of recycled pulp molding eyeglass case could be reduced by 8.78%-20.11%. Reducing the power consumption in the production process, accelerating the transformation of clean energy and constructing the recycling system of pulp molding waste can reduce the environmental footprint and promote the sustainable development of pulp molding.

KEY WORDS: pulp molding; life cycle assessment; SimaPro; climate change

随着人们环保理念日益增强,传统的石油基塑料被认为会对环境造成严重影响。纸浆模塑制品采用废弃纸或各种可再生的植物纤维作为原料,通过多道工序模压成型制得^[1],目前已在市场上获得了广泛的关注和应用,其在食品、工业和农业等领域的需求不断增加^[2-4],如用于制造眼镜盒的包装盒。这种纸浆模塑制品具有可降解、回收和循环使用的特性,相较于传统塑料制品,能有效减少对初级资源的消耗以及对环境的影响,在环境可持续性方面具有重要优势和应用潜力^[5-6]。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种能汇编所研究产品及其系统在生命周期中的各项输入、输出的工具,且能定量分析产品在整个生命周期范围内的资源消耗、环境排放情况,被广泛用于多个行业中产品的潜在环境影响评估,以帮助改善产品的环境可持续性和促进社会经济发展^[7-8]。尤其是欧盟产品环境足迹方法(Product Environmental Footprint, PEF),为产品的潜在环境足迹研究提供了科学、全面的方法指导,使得产品的生命周期研究具有可比性和一致性^[9]。

目前,有国内外学者在纸浆模塑制品的环境影响方面开展了初步研究。Didone 等^[10]对纸浆模塑制品制造所涉及的主要方面进行概述,包括纸浆模塑制品的分类、历史和当前应用、生产工艺、材料、力学性能和环境可持续性。龚宇等^[11]对纸浆模塑产品制备中纤维的选用与加工成型方式进行了全面介绍。Lv 等^[12]对比研究了干压纸浆模塑产品和湿压纸浆模塑产品的碳排放因子。霍李江等^[13]对比了纸浆模塑蛋托和 PVC 蛋托的环境影响,得出要优先选择纸浆模塑蛋托的结论。李慧霞^[14]通过对纸浆模塑餐盒及鸡蛋包装的研究,发现纸浆模塑在成型和干燥阶段能源消耗大,碳排放高。Ni 等^[15]对纸浆模塑产品进行生命周期评价,发现纸浆模塑产品的生产和废弃均对环境具有较大影响。

纸浆模塑眼镜盒作为近年来新兴的产品,市场规模逐渐扩大,受到越来越多的关注,然而,关于其环境影响尚未有系统的量化研究,因此受到了诸多争议。本文基于 PEF 方法,汇编了纸浆模塑眼镜盒的生命周期清单数据,采用 SimaPro 软件和 Ecoinvent 数据库构建其生命周期模型,量化眼镜盒的全生命周期环境影响,着重关注生产和废弃阶段,识别其生产过程中最相关的环境问题和过程,并进行环境影响解释和敏感性分析,以为减碳战略决策提供参考。

1 研究方法

1.1 目标与范围

1.1.1 目标及功能单位

本研究的功能单位是 1 000 kg 纸浆模塑眼镜盒,该眼镜盒以竹纤维、甘蔗纤维为原料制成,可用于包装护目镜、眼镜等。单个眼镜盒质量约为 32 g,具体信息如表 1 所示,眼镜盒尺寸涉及商业竞争,且不影响环境影响评价,暂不予披露。

本文的目的是量化识别该纸浆模塑眼镜盒全生命周期的环境负担,分析其生产阶段中与潜在环境影响最相关的生命周期阶段、过程,提供改善其环境影响的策略。

表 1 纸浆模塑眼镜盒的产品信息

Tab.1 Product information of the pulp molding eyeglass case

名称	工艺		质量/g	颜色
	成型	修整		
上托盖	全自动湿压	旋切	17(1±10%)	白色
下托底	全自动湿压	直切	15(1±10%)	白色

1.1.2 系统边界

本文进行了从摇篮到坟墓的生命周期评价,系统边界包括上游原料的获取及生产(如竹片、甘蔗渣、化学助剂等)、干燥浆板生产、浆板运输、制品成型加工以及消费后纸浆模塑眼镜盒的废弃处置,因眼镜盒在消费使用阶段不会产生较多额外的环境影响,本研究忽略消费使用阶段,系统边界如图 1 所示。

1.2 生命周期清单分析

1.2.1 数据来源

本研究对纸浆模塑眼镜盒的生产进行现场调研,以生命周期清单数据调查表的形式收集相关过程的数据(表 2),包括产品生命周期各阶段的能源消耗、材料投入和环境排放的原始数据,并对收集的数据进行审定、数据质量评分,确保数据无误。对于部分原辅料的生产数据,从 Ecoinvent 背景数据库中优先选用具有中国地理、工艺技术或时间代表性的次级数据集,保守选用全球范围(GLO)内其他区域具有代表性的次级替代数据集。分别对活动数据和次级数据进行数据质量评分,包括精密度、时间代表性、地理代表性和技术代表性,其平均数据质量 DQR 为 1.31,表明数据质量较好。

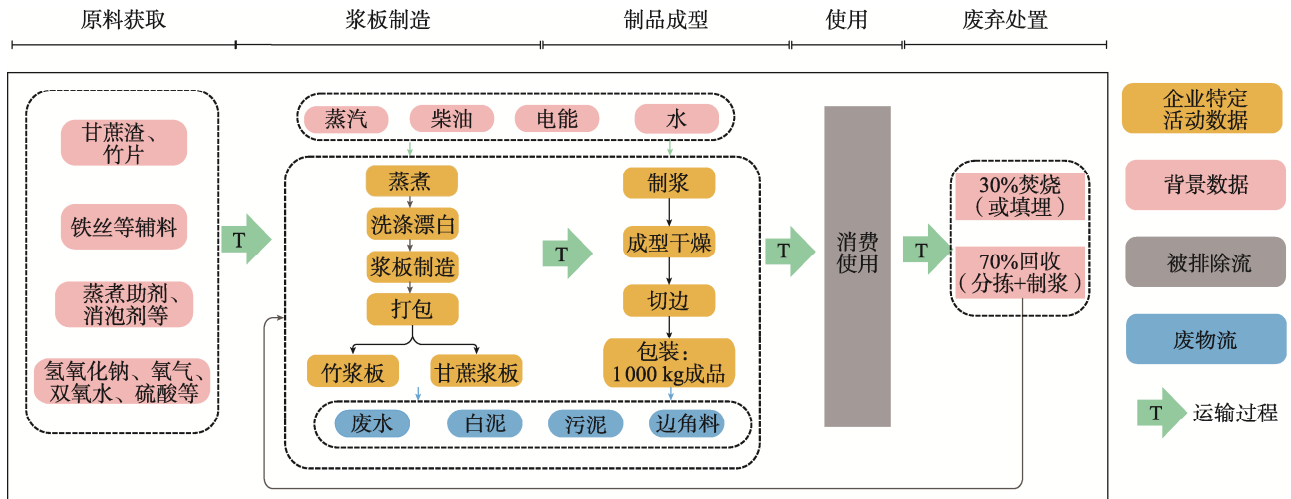


图 1 纸浆模塑眼镜盒生命周期的系统边界

Fig.1 System boundary of the life cycle of the pulp molding eyeglass case

1.2.2 清单分析

1) 原料获取和运输: 纤维原料来源于竹片、竹段和甘蔗渣等自然资源, 其中甘蔗渣购买于制糖等工业废弃物, 竹子材料加工成竹片、竹段等用于制浆工艺。竹子采集后平均运输 100 km 至加工厂, 处理加工每吨竹子会消耗 2.5 kW·h 的电能。

2) 浆板生产: 甘蔗渣和竹片经汽车运输 100~250 km 至广西来宾进行 2 种浆板的生产制造, 主要包括制浆(蒸煮脱氧、洗浆漂白)、浆板制造; 由于所用辅料、化学助剂等消耗量较小, 本研究忽略了其采购运输过程。制浆消耗了氢氧化钠等化学助剂, 用于竹片、甘蔗渣的蒸煮、漂白等工序。浆板生产过程中消耗的自来水主要用于制浆, 设备消耗的电能、蒸汽和其余辅料, 如柴油和铁丝等, 均使用 Ecoinvent 背景数据库中的相关数据进行分析, 同时忽略蒸煮助剂、消泡剂等辅料助剂。

3) 制品成型: 生产完成后的浆板通过汽车运输至东莞的纸浆模塑眼镜盒生产基地, 平均运输距离为 600~1 400 km。制品成型过程主要包括制浆(打浆、调浆和供浆)、成型干燥、切边、成品装箱以及废水处理 5 个单元。制浆过程中, 使用部分自来水, 回收水部分则来自整个循环水系统; 制品成型过程仅消耗了南方电网和部分光伏发电; 成品包装阶段使用瓦楞纸板进行成品装箱; 厂内的初步废水处理消耗了聚氯化铝、聚丙烯酰胺等部分化学助剂。

4) 废弃处置: 本文对纸浆模塑眼镜盒的多种废弃处理情景进行了探讨, 包括 100% 填埋、100% 焚烧和 70% 回收(其余 30% 被焚烧或填埋)。如表 3 所示, 废弃纸浆模塑产品的焚烧和填埋参考纸板的废弃处置模型。本研究假设回收边界结束于纸浆生产, 回收得到的纸浆可用于其他纸制品的生产和制造, 如替换竹浆和蔗渣浆的生产。

1.3 系统分配

1.3.1 回收分配

本文按照 PEF 所推荐的循环足迹公式^[8]进行废弃纸浆模塑产品的回收建模, 具体见式(1)。再生材料以及作为原料输入的原生材料的环境负担和收益分配(A)分别由不同的市场状况决定, 并且考虑了产品中回收材料部分比例(R_1)、生命周期结束时待回收材料部分比例(R_2)以及输入到生命周期系统和离开系统的回收料质量(Q_{Sin} 、 Q_{Sout})等因素。

$$C_{FF} = (1 - R_1)E_V + R_1 \left(AE_{rec} + (1 - A)E_V \times \frac{Q_{Sin}}{Q_P} \right) + (1 - A)R_2 \times \left(E_{recEoL} - E_V^* \times \frac{Q_{Sout}}{Q_P} \right) \quad (1)$$

式中: A 为回收材料供需平衡的因素; R_1 为产品中回收材料部分比例; R_2 为生命周期结束时待回收材料部分比例; Q_{Sin} 为进入生命周期内的回收料质量; Q_{Sout} 为离开生命周期时的回收料质量; Q_P 为原生材料的质量; E_V 为原生材料产生的环境影响; E_{rec} 为产品中回收料部分被回收加工过程的环境影响; E_{recEoL} 为产品在 EoL 阶段中回收过程的环境影响; E_V^* 为假定可用回收料替代的部分原始材料产生的环境负担。

在实际情况下, 纸浆模塑眼镜盒生产并未投入再生材料, 因此忽略来自上一系统的再生材料的环境影响分摊(R_1 、 E_{rec} 、 $Q_{Sin}=0$)。参考 PEF 推荐的循环足迹参数, 本文选取了纸材料的 A 值($A_{纸}=0.2$)。基于关于废弃纸浆模塑眼镜盒回收的假设, 其在生命周期结束阶段的回收率(R_2)为 70%, 且相较于原生的漂白纸浆, 回收再生得到的回收纤维纸浆质量有所下降($Q_{Sout}/Q_P=0.85$)。因此, 本文废弃纸浆模塑眼镜盒的回收按照上述循环足迹公式进行建模和环境影响分配。

表 2 每功能单位纸浆模塑眼镜盒生产过程中各阶段的清单数据

Tab.2 List data in each stage of production of pulp molding eyeglass cases per functional unit

生命周期	物质/能量流	单位	数据
竹片、竹段加工	竹子	kg	1 675.22
	电能	kW·h	4.19
	运输	km	167 521.60
竹浆板生产	竹片、竹段	kg	1 624.96
	氢氧化钠	kg	24.37
	蒸煮助剂	kg	1.06
	消泡剂	kg	0.28
	氧气	kg	36.56
	双氧水	kg	44.69
	二氧化氯	kg	8.94
	硫酸	kg	10.56
	阻垢剂	kg	0.12
	硫酸镁	kg	4.47
	铁丝	kg	1.14
	水	kg	21 124.47
	电	kW·h	568.74
	蒸汽	kg	1 868.70
甘蔗浆板生产	蔗渣	kg	1 635.52
	漂白蔗渣浆	kg	1 239.03
	氢氧化钠	kg	23.72
	蒸煮助剂	kg	2.45
	消泡剂	kg	0.98
	氧气	kg	7.36
	双氧水	kg	98.13
	二氧化氯	kg	11.45
	硫酸	kg	16.36
	阻垢剂	kg	0.82
	硫酸镁	kg	8.18
	水	kg	21 756.56
	电	kW·h	233.38
	蒸汽	kg	2 509.34
制品成型	柴油	kg	167.06
	铁丝	kg	1.44
	杀菌剂	kg	0.19
	竹浆板	kg	812.50
	甘蔗渣浆板	kg	437.50
	抗水剂	kg	18.75
	自来水	kg	4 284.27
	回收水	kg	415 416.70
	南方电网	kW·h	8 216.56
	浆水混合物（质量分数为 0.3%）	kg	416 666.70
废水处理	光伏	kW·h	1 080.00
	半成品（水分质量分数为 7%）	kg	1 344.09
	成品纸托	kg	1 000.00
	瓦楞纸箱	kg	10.00
	废水	kg	1 538.46
	聚氯化铝	kg	1.31
	聚丙烯酰胺	kg	0.034
	硫酸	kg	0.19
	氢氧化钠	kg	0.31
	硫酸铁	kg	0.27
	脱色剂	kg	0.02
	双氧水	kg	0.03

表 3 废弃纸浆模塑眼镜盒的生命周期终止假设
Tab.3 End-of-life assumptions of the discarded pulp molding eyeglass case

EOl 废弃处置	问题和考虑
焚烧	CO ₂ 排放到大气；不考虑能量回收；参考 Ecoinvent 背景数据库纸的焚烧模型
填埋	纸板降解缓慢；参考 Ecoinvent 背景数据库纸的填埋模型
回收	参考 Ecoinvent 背景数据库，采用循环足迹公式（CFF）建模

1.3.2 副产品分配

在制品成型过程中，每生产 1 000 kg 纸浆模塑眼镜盒成品，产生 250 kg 的边角料，最终外售至有关厂商。这些边角料副产品共同分摊了纸浆模塑眼镜盒整个生命周期内约 20% 的物料和能源消耗，因此在纸浆模塑眼镜盒的 LCA 建模过程中，考虑了该部分副产品对整体环境影响的分配情况。

1.4 生命周期环境影响评价

本文采用 SimaPro 9.50 软件和 Ecoinvent 3.9.1 背景数据库对纸浆模塑眼镜盒生命周期内所有的过程、物料能源输入和环境排放进行构建和编辑。采用 Environmental Footprint (EF) 3.1 对 16 种共识的环境足迹进行环境影响分析，包括酸化、气候变化、淡水生态毒性、淡水富营养化、海洋富营养化、陆地富营养化、人类毒性-癌症、人类毒性-非癌症、电离辐射、土地使用、臭氧消耗、颗粒物形成、光化学臭氧形成、水资源消耗、化石资源利用以及矿物金属资源消耗^[16-23]。从产品生命周期的角度来看，EF 3.1 标准化因子^[24]和加权因子^[25]用于本文对环境影响特征化结果的深入分析，以综合识别纸浆模塑眼镜盒生产周期中值得重视的最相关环境足迹、生命周期阶段和工艺工程问题。

2 结果与讨论

2.1 环境影响结果

不同生命周期阶段对环境造成了不同程度的影响，如表 4 所示。竹浆板、甘蔗渣浆板生产的 2 个阶段对纸浆模塑眼镜盒生产生命周期内多个环境问题的贡献比较突出，如酸化、气候变化、颗粒物形成和化石资源利用等。1 000 kg 纸浆模塑眼镜盒生产的碳排放为 6 164.25 kg CO₂ eq.，其中，制品成型阶段贡献了 77.02%（4 747.89 kg CO₂ eq.），竹浆板和甘蔗渣浆板生产过程分别贡献了 7.09%（436.91 kg CO₂ eq.）和 12.81%（789.67 kg CO₂ eq.）。如图 2 所示，这主要与不同生命周期阶段中化石资源利用引起的气候变化有关，而生物源和土地转化引起的气候变化仅占较小部分。在生命周期结束阶段，纸浆模塑眼镜盒的

表 4 1000 kg 纸浆模塑眼镜盒不同生产生命周期阶段的环境影响特征化结果
Tab.4 Results of the characterization of environmental impacts at different production life cycle stages of 1000 kg pulp molding eyeglass case

EF 3.1 环境类别	单位	竹段加工	原料运输		浆板生产		浆板运输		制品成型	生产总计	废弃处置			
			竹片	蔗渣	竹浆板	蔗渣浆板	竹浆板	蔗渣浆板			100% 焚烧	100% 填埋	70%回收+30%焚烧	70%回收+30%填埋
酸化	mol H ⁺ eq.	0.37	0.02	0.05	1.95	3.60	0.13	0.03	27.57	33.72	0.69	0.69	-1.19	-1.19
气候变化	kg CO ₂ eq.	83.10	8.78	22.10	436.91	789.67	61.60	14.20	4 747.89	6 164.25	226.01	1 678.09	-334.76	100.87
淡水生态毒性	10 ² CTUe	18.40	0.03	0.08	16.50	28.40	2.18	0.05	121.23	188.00	23.40	49.90	74.60	82.50
淡水富营养化	10 ⁻³ kg P eq.	9.10	0.04	0.10	87.10	110.00	0.27	0.06	864.01	1 070.00	3.70	6.09	-22.50	-21.80
海洋富营养化	10 ⁻¹ kg N eq.	0.62	0.03	0.08	6.70	5.56	0.21	0.05	55.3	68.50	2.00	19.10	-3.00	2.10
陆地富营养化	10 ⁻¹ mol N eq.	9.74	0.33	0.83	33.80	55.70	2.31	0.53	572.6	676.00	187.00	132.00	-19.80	-21.50
人类毒性, 癌症	10 ⁻⁹ CTUh	53.10	0.30	0.76	28.30	67.00	2.11	0.49	49.50	202.00	18.10	18.20	97.60	97.70
人类毒性, 非癌症	10 ⁻⁸ CTUh	2.43	0.34	0.86	12.80	15.70	2.40	0.55	136.00	172.00	8.34	266.00	16.00	93.10
电离辐射	kBq U-235 eq.	2.30	0.58	1.45	36.70	75.20	4.04	0.93	303.30	425.00	12.00	13.60	790.00	791.00
土地使用	10 ¹ Pt	173.00	0.03	0.07	41.70	61.30	0.18	0.04	496.49	2 325.88	3.35	19.80	-64.60	-59.60
臭氧消耗	10 ⁻⁵ kg CFC11 eq.	0.67	0.22	0.55	4.34	20.80	1.53	0.35	2.33	30.70	4.63	4.65	-7.78	-7.77
颗粒物形成	10 ⁻⁵ disease inc.	0.62	0.09	0.22	2.02	3.17	0.60	0.14	35.90	42.80	0.79	0.81	-0.66	-0.65
光化学臭氧形成	kg NMVOC eq.	0.22	0.01	0.03	0.97	1.83	0.08	0.02	14.95	18.10	0.64	1.06	-0.49	-0.36
化石资源利用	MJ	0.07	0.01	0.03	0.58	1.74	0.09	0.02	4.70	7.25	0.28	0.29	0.21	0.22
矿物金属消耗	10 ⁻⁵ kg Sb eq.	6.48	0.04	0.10	6.69	19.10	0.29	0.07	20.90	53.70	3.60	1.69	2 390.00	2 390.00
水资源消耗	m ³ depriv.	0.24	-0.02	-0.05	140.00	288.00	-0.15	-0.03	827.57	1 280.00	34.80	1.31	863.00	853.00
气候变化: 生物源	10 ⁻¹ kg CO ₂ eq.	0.10	0.01	0.01	168.00	2.60	0.02	0.01	60.40	255.00	0.80	14 587.10	-77.70	4 376.10
气候变化: 化石源	kg CO ₂ eq.	82.20	8.80	22.10	420.00	787.00	61.60	14.20	4 740.80	6 140.00	225.92	219.00	-327.00	-329.00
气候变化: 土地有关源	10 ⁻³ kg CO ₂ eq.	89.00	0.01	0.02	15.70	19.80	0.05	0.01	105.00	230.00	1.00	2.00	-3.00	-3.00

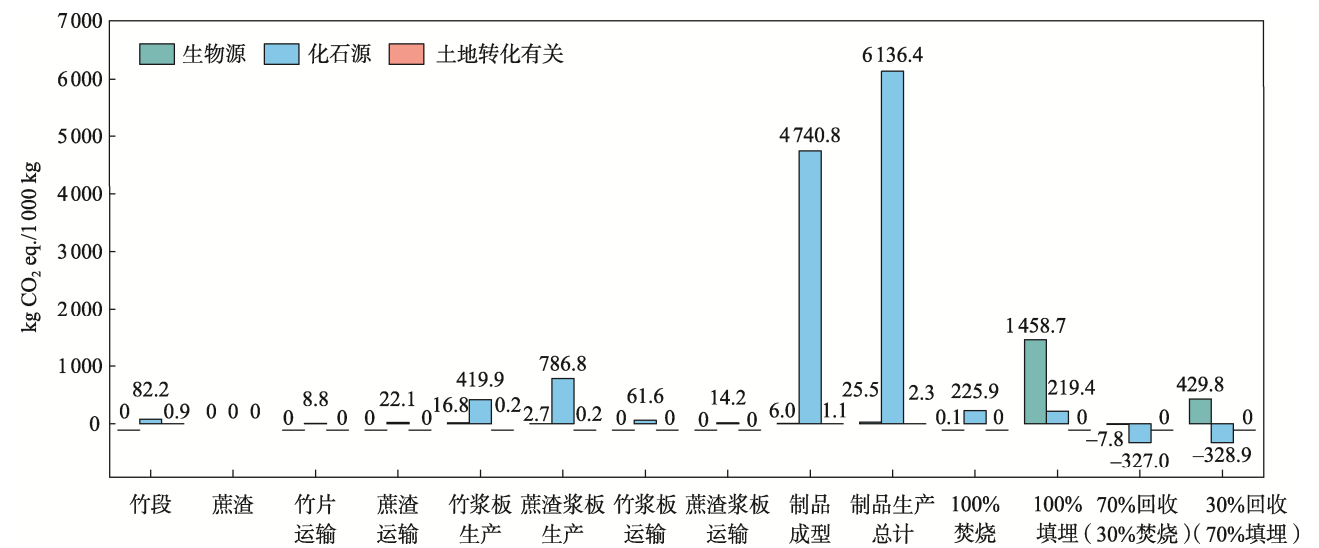


图 2 纸浆模塑眼镜盒不同生命周期阶段的气候变化结果分类
Fig.2 Classification of climate change results at different life cycle stages of pulp molding eyeglass case

100%填埋会增加 1 458.71 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品的生物源碳排放,100%焚烧会导致 225.92 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品的化石源碳排放,而回收处理有助于降低生物源和化石源碳排放。

2.2 最相关环境影响类别

本文对纸浆模塑眼镜盒生产过程的环境影响结果进行标准化、加权处理,分析其生产过程中最突出的环境影响类别。如图 3 所示,气候变化(37.84%)、化石资源利用(20.37%)、颗粒物形成(14.13%)、酸化(8.21%)和光化学臭氧形成(4.64%)对总环境影响潜值累计贡献>80%,是纸浆模塑眼镜盒生产生命周期中最相关的环境影响类别。考虑到气候变化是目前公众高度关注的环境问题,本文对其进行重点分析。

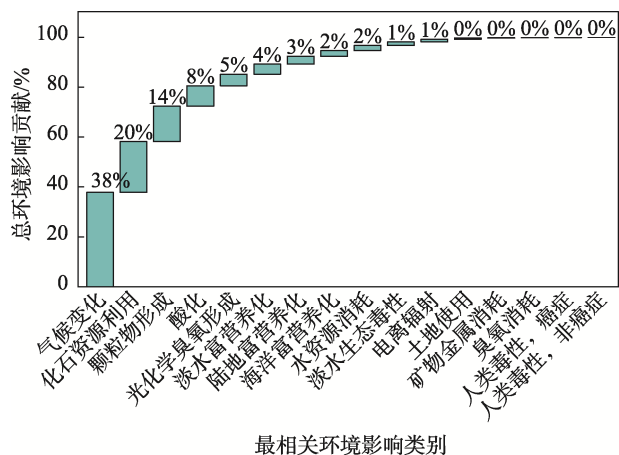


图3 纸浆模塑眼镜盒生产的最相关环境影响类别
Fig.3 Most relevant environmental impact categories for the production of pulp molding eyeglass case

2.3 最相关生命周期阶段和过程

如图 4 所示,竹浆板、甘蔗渣浆板生产以及制品成型 3 个生命周期阶段对多个最相关环境影响类别的累积贡献均>80%,是纸浆模塑眼镜盒生产生命周期内最相关的阶段。具体来说,竹浆板、甘蔗渣浆板生产以及制品成型对气候变化的贡献占比分别为 8.15%、12.53%和 75.35%,主要与这 3 个阶段中电能、蒸汽能源消耗等产生的温室气体有关。比如,南方电网的消耗和供电为纸浆模塑眼镜盒生产过程中的气候变化影响贡献了 77.1%,浆板成型阶段中蒸汽能源消耗贡献了 12.2%等。

2.4 不确定性分析

使用蒙特卡洛模拟分析纸浆模塑眼镜盒的活动数据和背景数据的不确定性对 LCA 结果的影响。通过 1 000 次蒙特卡洛分析可知,生产 1 000 kg 纸浆模

塑眼镜盒的平均碳排放为 6 158.68 kg CO₂ eq.,标准偏差为 765.70 kg CO₂ eq.,相对标准偏差为 12.23%,<15%,说明纸浆模塑眼镜盒生产生命周期的气候变化结果具有较好的确定性。类似地,酸化、化石资源利用、颗粒物、光化学臭氧形成等环境影响结果均具有较好的确定性。

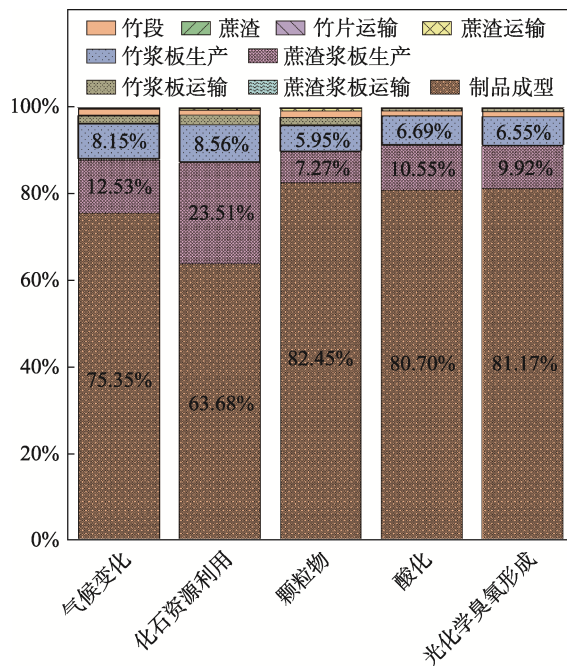


图4 纸浆模塑眼镜盒生产的最相关生命周期阶段
Fig.4 Most relevant life cycle stages for the production of pulp molding eyeglass case

2.5 关键过程的敏感性分析

从不同过程对生命周期结果的贡献分析可知,电能和蒸汽能源消耗是引起气候变化等最相关环境影响的重要因素,因此本文探讨了电能和蒸汽能源消耗量偏差 10%对纸浆模塑眼镜盒生产的环境问题的影响。如图 5a 所示,蒸汽能源消耗量的变化几乎不会对气候变化、化石资源利用等环境影响结果产生影响;而电能消耗量的变化会造成气候变化、化石资源利用等环境影响结果 7%~9%的波动,如图 5b 所示,当纸浆模塑眼镜盒生产过程中耗电量减少 10%时,1 000 kg 纸浆模塑眼镜盒生产造成的气候变化结果减少至 5 795.55 kg CO₂ eq./1000 kg 制品,化石资源利用减少至 68 877.59 MJ/1 000 kg 制品。

考虑到目前国内光伏等清洁能源的迅速发展和建设投入,本文对比了不同类型电能结构对 LCA 结果的影响情况,如图 5c~d 所示。相比生产活动中所使用的华东/南方电网,清洁能源(如光伏、风电等)对纸浆模塑眼镜盒生产阶段的 LCA 结果有着十分显著的环境效益。比如,使用清洁能源替代 50%的混合电可降低 40%左右的碳排放;若完全使用清洁能源,

生产 1 000 kg 纸浆模塑眼镜盒的气候变化结果可从 6 301.39 kg CO₂ eq. 降低至 1 244.00 kg CO₂ eq., 明显降低了约 80%, 其他环境影响可降低约 68%~98%。

2.6 不同废弃处置对 LCA 结果的影响

本文分析了纸浆模塑眼镜盒的废弃处置模型, 包括 100% 焚烧、100% 填埋和 70% 回收。如图 6 所示, 焚烧和填埋均会不同程度地增加环境影响, 100% 焚烧过

程会导致 226.01 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品的温室气体释放, 而 100% 填埋过程会释放出 1 678.10 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品的温室气体, 且填埋会释放大量的生物源甲烷气体 (1 458.71 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品)。完全焚烧、填埋后, 纸浆模塑眼镜盒全生命周期的气候变化结果分别为 6 390.25 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品、7 842.34 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品, 整体碳排放增加 3.67%~27.22%, 其他最相关环境影响结果也增加了 1.82%~5.76%。

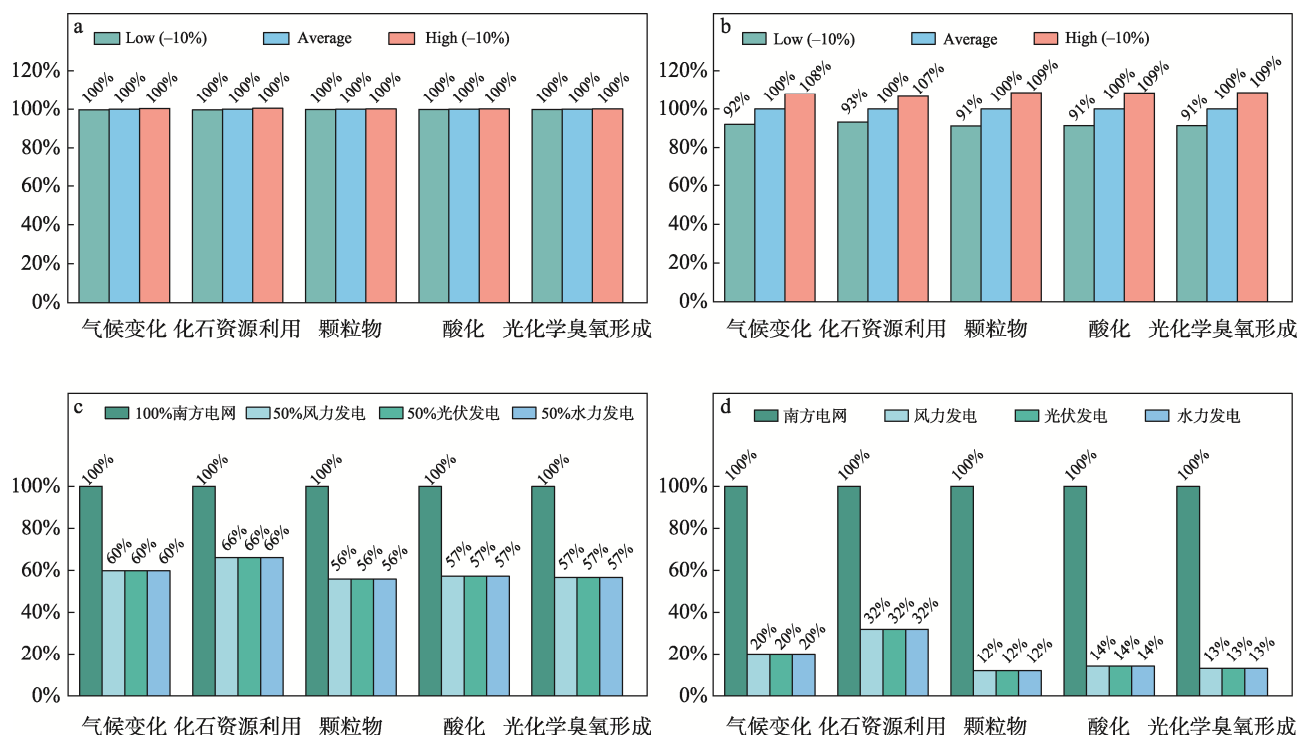


图 5 电能和蒸汽能源消耗对最相关环境问题的敏感性分析

Fig.5 Sensitivity analysis of electrical and steam energy consumption to the most relevant environmental issues

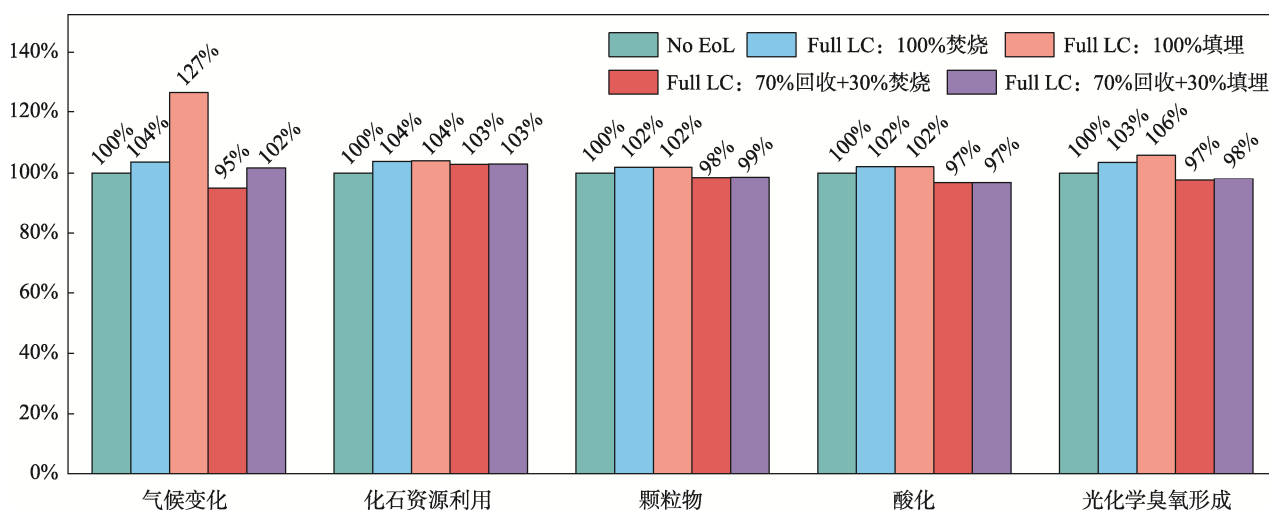


图 6 不同废弃处置下纸浆模塑眼镜盒的最相关环境影响结果

Fig.6 Most relevant environmental impact results for pulp molding eyeglass case under different waste disposals (from cradle to grave)

相比之下, 纸浆模塑眼镜盒的废弃回收有利于降低气候变化等最相关环境影响结果。当废弃纸浆模塑眼镜盒 70%被回收、30%被焚烧后, 其全生命周期气候变化结果减少至 5 829.49 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品, 因为回收纸浆代替所消耗的竹浆和甘蔗渣浆会产生较大的环境效益, 从而抵消焚烧和回收过程造成的气候变化等环境影响结果。若 30%填埋, 气候变化结果为 6 265.12 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品, 这是由于其填埋过程会释放大量的生物源温室气体 (437.61 kg CO₂ eq./1 000 kg 制品), 导致碳排放结果增加。

3 结语

基于 PEF 方法对纸浆模塑眼镜盒进行了生命周期分析, 研究发现, 1 000 kg 纸浆模塑眼镜盒生产生命周期的碳排放为 6 164.25 kg CO₂ eq.; 同时, 气候变化、化石资源利用、颗粒物形成、酸化以及光化学臭氧形成被确定为最相关的环境影响类别。根据敏感性分析结果, 电能对最相关环境影响类别有直接影响, 在企业实际工艺中, 降低生产过程中的电能消耗或加速清洁能源的构建和转型可减少气候变化等环境影响, 例如, 采用清洁能源替代传统电能, 最多可减少生产过程中约 80%的气候变化影响。

本文还对纸浆模塑眼镜盒的不同废弃处置情景进行了探讨, 相较于完全焚烧和填埋处置, 采用 70%回收(其余 30%被焚烧或填埋)的处置情景, 1 000 kg 纸浆模塑眼镜盒的气候变化结果可降低 8.78%~20.11%。因此, 加快建立纸浆模塑废弃物的回收系统, 推动纸浆模塑制品的回收, 有助于提高其市场竞争力, 减少环境影响, 逐步实现以纸代塑, 为绿色可持续发展提供支持。

参考文献:

- [1] 阮金刚. 纸浆模塑制品的研究趋势与发展现状展望[J]. 商讯(商业经济文荟), 2019(6): 132-133.
RUAN J G. Research Trends, Development Status and Prospects of Pulp Molding Products[J]. Business News (Business Economics Review), 2019(6): 132-133.
- [2] 叶劲松, 蒲彪. 我国食品包装及市场的现状与发展[J]. 食品与机械, 2002, 18(4): 32-35.
YE J S, PU B. The Status and Development of Food Packaging and Its Market in China[J]. Food & Machinery, 2002, 18(4): 32-35.
- [3] 刘美仙, 程峥, 肖乃玉, 等. 纸浆模塑在食品包装领域研究进展[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2025, 38(1): 65-71.
- [4] LIU M X, CHENG Z, XIAO N Y, et al. Research Progress of Pulp Molding in the Field of Food Packaging[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2025, 38(1): 65-71.
- [4] 综合整理. 纸塑包装前景光明, 受到行业青睐[J]. 中国包装, 2021, 41(11): 43-44.
Comprehensive Arrangement. Paper and Plastic Packaging Has a Bright Future and Is Favored by the Industry[J]. China Packaging, 2021, 41(11): 43-44.
- [5] LIU Y F, MA S F, WANG F J, et al. Advances in Research of Molded Pulp for Food Packaging[J]. Journal of Renewable Materials, 2023, 11(11): 3831-3846.
- [6] 黄品歌, 张艳, 孟毅, 等. 生物质基天然纤维包装材料的研究现状及发展趋势[J]. 包装学报, 2022, 14(5): 66-74.
HUANG P G, ZHANG Y, MENG Y, et al. Biomass-Derived Nature Fibers for Packaging Materials: The State-of-the-Art and Future[J]. Packaging Journal, 2022, 14(5): 66-74.
- [7] International Organization for Standardization. ISO14040: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework[S]. Geneva: ISO, 1997.
- [8] International Organization for Standardization. ISO14044: Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines[S]. Geneva: ISO, 2006.
- [9] LUCA Z, RANA P. Suggestions for Updating the Product Environmental Footprint (PEF) Method[R]. Strasbourg: Joint Research Centre, 2019: 23-39.
- [10] DIDONE M, SAXENA P, BRILHUIS-MEIJER E, et al. Moulded Pulp Manufacturing: Overview and Prospects for the Process Technology[J]. Packaging Technology and Science, 2017, 30(6): 231-249.
- [11] 龚宇, 杨泽川, 孙彬青, 等. 纸浆模塑制品制备工艺及性能研究进展[J]. 天津造纸, 2024, 46(1): 15-21.
GONG Y, YANG Z C, SUN B Q, et al. Research Progress on the Preparation Process and Properties of Pulp Molded Products[J]. Tianjin Paper Making, 2024, 46(1): 15-21.
- [12] LV Z S, JIANG S H, WEI L J, et al. Carbon Emissions Analysis of the Pulp Molding Industry: A Comparison of Dry-Press and Wet-Press Production Processes[J]. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 2023, 38(4): 573-582.
- [13] 霍李江, 赵昱. 鸡蛋包装生产工艺的生命周期评价[J]. 包装学报, 2021, 13(3): 37-43.
HUO L J, ZHAO Y. Life Cycle Assessment of Egg Packaging Production Technology[J]. Packaging Journal, 2021, 13(3): 37-43.

- [14] 李慧霞. 基于全生命周期的纸包装材料碳排放建模与分析[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
- LI H X. Modeling and Analysis of Carbon Emission of Paper Packaging Materials Based on Whole Life Cycle [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2024.
- [15] NI X Q, LI Z M, CUI Z J, et al. Environmental Protection Status and Analysis of Pulp Molded Products Based on LCA[M]//Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging Technology and Materials. Singapore: Springer Singapore, 2021: 466-470.
- [16] SEPPÄLÄ J, POSCH M, JOHANSSON M, et al. Country-Dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator (14 Pp)[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(6): 403-416.
- [17] CHEN Z N, DAVIDSON O, HARE B, et al. Climate Change 2007: Synthesis Report[R]. Geneva: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: 29-71.
- [18] ROSENBAUM R K, BACHMANN T M, GOLD L S, et al. USEtox—The UNEP-SETAC Toxicity Model: Recommended Characterisation Factors for Human Toxicity and Freshwater Ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(7): 532-546.
- [19] FRISCHKNECHT R, BRAUNSCHWEIG A, HOFSTETTER P, et al. Human Health Damages Due to Ionising Radiation in Life Cycle Impact Assessment[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(2): 159-189.
- [20] JOLLIET O, ANTÓN A, BOULAY A M, et al. Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators: Impacts of Climate Change, Fine Particulate Matter Formation, Water Consumption and Land Use[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, 23(11): 2189-2207.
- [21] World Meteorological Organization. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014[M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2014: 59-68.
- [22] VANZELM R, HUIJBREGTS M A J, DENHOLLANDER H A, et al. European Characterization Factors for Human Health Damage of PM₁₀ and Ozone in Life Cycle Impact Assessment[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(3): 441-453.
- [23] KLINGLMAIR M, SALA S, BRANDÃO M. Assessing Resource Depletion in LCA: A Review of Methods and Methodological Issues[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(3): 580-592.
- [24] CRENNNA E, SECCHI M, BENINI L, et al. Global Environmental Impacts: Data Sources and Methodological Choices for Calculating Normalization Factors for LCA[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019, 24(10): 1851-1877.
- [25] SALA S, CERUTTI A, PANT R. Development of a Weighting Approach for the Environmental Footprint[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018: 11-28.