

# 基于生命周期评价的纸浆模塑天地盖礼盒环境影响分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.05.006

李甫印<sup>1,2</sup> 张 暖<sup>1</sup>  
林勤保<sup>1</sup> 杨青华<sup>3</sup>  
韦杰录<sup>1</sup>

1. 暨南大学  
包装工程学院  
广东 珠海 519070  
2. 中荣印刷集团(中山)  
股份有限公司  
广东 中山 528403  
3. 知里科技(广东)  
有限公司  
广东 广州 510000

**摘 要:** 使用 SimaPro 软件和 Ecoinvent 数据库对纸浆模塑天地盖礼盒生产的生命周期进行建模, 采用 EF 3.0 方法对生命周期进行环境影响分析, 量化和识别其生产过程中的主要环境足迹及其贡献过程, 并解释其环境影响。结果表明: 生产一万套纸浆模塑天地盖礼盒造成的气候变化影响为 7609.27 kg CO<sub>2</sub> eq., 其中由化石资源引起的碳排放为 7591.24 kg CO<sub>2</sub> eq.。在纸浆模塑礼盒生产过程中, 气候变化、化石资源消耗、颗粒物、酸化和光化学臭氧形成是主要的环境影响类别, 累积贡献超过了整体环境影响的 80%。热压整形过程中电能消耗是引起环境问题的主要原因。通过敏感性分析可知, 减少生产过程中的电能消耗量或者使用清洁能源, 最多可减少约 95% 的碳足迹, 并降低整体环境影响。

**关键词:** 纸浆模塑礼盒; 生命周期评价; SimaPro; GaBi; 碳足迹

**中图分类号:** TB489

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2024)05-0043-09

**引文格式:** 李甫印, 张 暖, 林勤保, 等. 基于生命周期评价的纸浆模塑天地盖礼盒环境影响分析 [J]. 包装学报, 2024, 16(5): 43-51.

随着国内禁塑政策的加强, 绿色可持续发展逐渐成为包装行业的迫切需求。纸浆模塑的市场需求不断增长<sup>[1-2]</sup>。纸浆模塑制品是以可再生、可降解植物纤维为主要原料, 通过多种工序和模压技术制成。纸浆模塑制品能够替代传统的包装制品, 并实现相同的包装用途, 因此广泛应用于食品、工业和农业等领域, 比如天地盖礼盒包装、工业缓冲包装等<sup>[3]</sup>。从环境影响的角度来看, 纸浆模塑使用天然或废弃植物纤维, 可以降低对不可再生初级资源的消耗, 减少资源浪费, 在环境可持续方面表现出一定的优势或潜力<sup>[4-5]</sup>。

生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 是一种从环境足迹角度分析产品及其系统在生命周期内的投入、排放以及潜在环境影响的决策工具和方法。LCA 不仅可以帮助识别产品的主要环境影响, 还能改善产品的环境可持续性和促进社会经济发展<sup>[6-7]</sup>。LCA 已广泛用于评估纸包装行业的环境影响。对于常见的瓦楞纸板和白卡纸折叠纸盒等各种制品, 包装制品生产阶段是值得重点关注的生命周期阶段<sup>[8-11]</sup>。研究表明, 使用纸浆模塑制品代替传统聚氯乙烯鸡蛋包装, 能够降低生产鸡蛋包装过程所造成

**收稿日期:** 2024-05-24

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

**作者简介:** 李甫印 (1987-), 男, 山东菏泽人, 高级工程师, 主要研究方向为生命周期评价和食品包装安全,

E-mail: lifuyinsd@163.com

**通信作者:** 林勤保 (1968-), 男, 山西临县人, 暨南大学研究员, 博士, 主要研究方向为生命周期评价和食品包装安全,

E-mail: tlinqb@jnu.edu.cn

的环境负荷<sup>[8]</sup>。

欧盟产品环境足迹评价 (product environmental footprint, PEF) 是基于 LCA、用于量化产品环境足迹的一套方法体系<sup>[12]</sup>。故本研究基于 PEF 规范, 采用 SimaPro 9.50 软件和 Ecoinvent 3.9.1 对纸浆模塑天地盖礼盒生产生命周期进行建模, 识别和量化纸浆模塑礼盒生产过程中最相关的环境影响阶段和过程, 并进行环境影响贡献和敏感性分析, 以期降低纸浆模塑生产过程环境影响提供参考。

## 1 研究方法

本研究遵循 ISO 14040: 2006 *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Frameworks*<sup>[13]</sup> 和 PEF 标准, 从目标与范围定义、生命周期清单分析 (life cycle inventory analysis, LCIA)、生命周期环境影响评价、生命周期解释进行 LCA 研究。

### 1.1 目标与范围定义

#### 1.1.1 目标及功能单位

本研究的目的是识别和量化纸浆模塑礼盒生产过程中的潜在环境影响、最相关环境影响类别以及最相关过程, 并对其生产过程提出改善意见, 以此帮助减少纸浆模塑制品生产过程中的环境问题。

以一万套纸浆模塑天地盖礼盒为功能单位。礼盒由天盖和地盒两部分组成 (见图 1), 均采用纸浆模塑材料, 无内衬和隔板等其他部件, 结构简单。单个礼盒的外尺寸约为 101.5 mm × 182 mm × 58 mm。

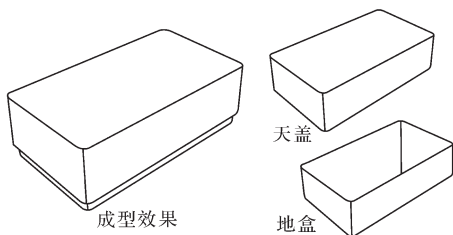


图 1 纸浆模塑礼盒结构简图

Fig. 1 Structure diagram of a pulp molding gift box

#### 1.1.2 系统边界

采用“大门到大门”方法研究与纸浆模塑天地盖礼盒生产制造有关的生命周期环境影响。系统边界从原材料采购开始, 到产品的成品礼盒包装结束, 忽略木浆、竹浆等原料的制造以及产品销售、使用、废弃处置等后续阶段。如图 2 所示, 礼盒的生产生命周期包括原料运输、打浆、调浆、供浆、成型、热压整形、烘干、切边和成品装箱工艺过程。

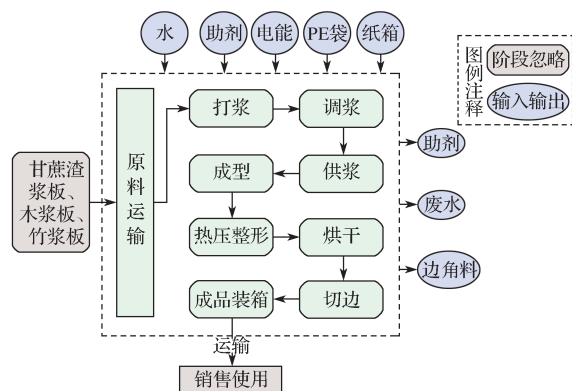


图 2 纸浆模塑礼盒生产生命周期的系统边界

Fig. 2 System boundary of the production of pulp molding gift boxes

### 1.2 生命周期清单分析

#### 1.2.1 数据来源

从中荣公司数据源以及天津工厂的实际生产运行记录中, 收集纸浆模塑天地盖礼盒生产过程各工序中的能源和材料的输入与输出数据 (活动数据)。将收集到的数据填写在定制的 LCA 数据表中, 并审定各单元过程所有流之间的关联进行质量平衡计算, 以保证所收集数据具有较好的精密度和时间代表性。

对于其它外部过程的次级背景数据 (比如水、能源、化学试剂等的生产), 首先从相关文献资料获取生命周期清单数据, 其次从 Ecoinvent 3.9.1 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, 最后才保守选用全球范围内或其它区域代表性的次级替代数据集。为确保本纸浆模塑天地盖礼盒生命周期评价的研究质量, 按照 PEF 方法指南分别对活动数据和次级背景数据进行数据质量评分 (包括精密度  $P$ 、时间代表性  $TiR$ 、地理代表性  $GeR$  和技术代表性  $TeR$  等指标)。通过计算得出, 本 LCA 研究的数据质量满足使用要求 ( $P < 3$ ,  $TiR/TeR/GeR < 2$ ), 且平均数据质量为 1.25, 因此本研究具有较好的数据质量。

#### 1.2.2 清单分析

纸浆模塑制品的原料包括木浆板、竹浆板和甘蔗渣浆板。木浆板从海外智利采购, 海运 19 629 km 至中国天津港口, 陆运 71 km 到天津工厂; 竹浆板来自贵州, 陆运 2077 km 至天津工厂; 甘蔗渣浆板采购于泰国, 海运 4569 km 至中国天津港口, 陆运 71 km 至天津工厂。浆板原料运输的生命周期清单数据如表 1 所示。



浆板原料运输到天津工厂后, 进行纸浆模塑天地盖礼盒的生产加工: 打浆、调浆、供浆、成型、热压整形、烘干、切边和成品装箱。混合电网是最主要的能源输入, 此外, 在调浆阶段消耗了自来水以及染料、蜡水、固色剂等化学助剂。纸浆模塑礼盒生产各阶段的能源、物料消耗和输出情况如表 2 所示。

表 1 浆板原料运输的生命周期清单数据

Table 1 Life cycle inventory data of transportation for pulpboard raw materials

原料	运输方式	距离 /km
木浆板	海运	19 629
	陆运	71
竹浆板	陆运	2077
甘蔗渣浆板	海运	4569
	陆运	71

表 2 每功能单位纸浆模塑礼盒生产过程的生命周期清单数据

Table 2 Life cycle inventory data per functional unit of pulp molding gift boxes in production process

生产工序	材料、能源类型	单位	数量
打浆	木浆板	kg	50
	甘蔗浆板	kg	20
	竹浆板	kg	30
	自来水	kg	1900
	混合电网	kW·h	44.4
调浆	浆水混合物 (质量浓度 5%)	kg	2000
	助剂蜡水	kg	2
	助剂染料	kg	11
	助剂固色剂	kg	4
	助剂硫酸铝	kg	1.5
	助剂防水剂	kg	3
	自来水	kg	26 571
	混合电网	kW·h	60
	浆水混合物 (质量浓度 0.35%)	kg	28 592.5
	混合电网	kW·h	175.75
成型	浆水混合物 (质量浓度 0.35%)	kg	28 592.5
	混合电网	kW·h	13.9
热压整形	湿坯 (水质量占比 70%)	kg	333.3
	混合电网	kW·h	7406.667
烘干	半成品	kg	101.5
	自来水	kg	5
	混合电网	kW·h	3
切边	半成品	kg	101.5
	混合电网	kW·h	4.317
成品装箱	成品盒子	kg	81.2
	瓦楞纸箱	kg	144.27
	聚乙烯 PE 袋	kg	24
	垫片	kg	12.32
	混合电网	kW·h	1

### 1.2.3 生命周期环境影响评价

对纸浆模塑天地盖礼盒生产的各过程进行环境影响评价, 即原料运输、打浆、调浆、供浆、成型、热压整形、烘干、切边、成品装箱, 使用 SimaPro 9.50 软件和 Ecoinvent 3.9.1 数据库构建各单元过程以及过程中的物料和能源输入, 并根据 EF 3.0 方法对 PEF 规定的 16 种环境足迹类型进行评估, 如表 3 所示。将各环境足迹结果进行特征化、标准化和加权分析, 以综合评估所有环境影响类型和生命周期阶段的相关性<sup>[14-15]</sup>, 更好地认识所研究产品系统中每个环境影响类别和单元过程之间的关系, 并帮助识别纸浆模塑礼盒生产的最相关环境影响类别和生产过程。

表 3 环境足迹影响类型及其指标

Table 3 Environmental footprint impacts and corresponding indicators

环境足迹类型	环境影响指标	单位	环境影响评价模型
气候变化	全球变暖潜值 (GWP 100)	kg CO <sub>2</sub> eq.	IPPC 基线模型 <sup>[16]</sup>
臭氧消耗	臭氧消耗潜值	kg CFC-11 eq.	WMO 定态 ODPs <sup>[17]</sup>
人体致癌毒性	人类比较毒性单位	CTUh	USEtox 模型 <sup>[18]</sup>
人体非致癌毒性	人类比较毒性单位	CTUh	USEtox 模型 <sup>[18]</sup>
颗粒物	对人类健康的影响	Disease incidences	UNEP 推荐模型 <sup>[19]</sup>
电离辐射	U <sup>235</sup> 的人体暴露效率	kBq U <sup>235</sup> eq.	人类健康效应模型 <sup>[20]</sup>
光化学臭氧形成	对流层臭氧浓度增加	kg NMVOC eq.	LOTOS-EUROS 模型 <sup>[21]</sup>
酸化	累计超标	mol H <sup>+</sup> eq.	累计超标 <sup>[22]</sup>
陆地富营养化	累计超标	mol N eq.	累计超标 <sup>[22]</sup>
淡水富营养化	到达淡水终端的营养物质比例	kg P eq.	EUTREND 模型 <sup>[23]</sup>
海水富营养化	到达海洋终端的营养物质比例	kg N eq.	EUTREND 模型 <sup>[23]</sup>
淡水生态毒性	生态系统的比较毒性单位	CTUe	USEtox 模型 <sup>[18]</sup>
土地使用	土壤质量指数	Pt	LANCA <sup>[24]</sup>
水资源消耗	水使用耗竭潜值	m <sup>3</sup> world eq.	Available Water Remaining (AWARE) <sup>[25]</sup>
矿物金属消耗	资源最终储量	kg Sb eq.	ADPs <sup>[26]</sup>
化石能源消耗	资源最终储量	MJ	ADPs <sup>[26]</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 生命周期影响评价分析

每功能单位纸浆模塑礼盒生产过程的环境影响结果如附表 1 所示。由表可知,在纸浆模塑天地盖礼盒的生产过程中,原料运输、打浆、制浆等阶段对环境碳足迹造成了不同程度的贡献。每功能单位的纸浆模塑制品生产过程造成的总碳排放为 7609.27 kg CO<sub>2</sub> eq.,其中由化石能源引起的碳排放为 7591.24 kg CO<sub>2</sub> eq.,由生物碳和土地转化引起的气候变化仅占极小的部分。热压整形工序对碳足迹贡献最大,造成了 6948.96 kg CO<sub>2</sub> eq.,这与热压整形过程中的较大耗电量有关。此外,热压整形对其它环境影响也都明显较大,比如酸化 36.31 mol H<sup>+</sup> eq.、化石能源消耗 67 265.83 MJ 等,这与酸化物质排放和初级资源消耗密切相关。

### 2.2 环境影响类型的贡献分析

将附表 1 中特征化结果进行归一化处理,得到各环境影响类型的归一化基准值。图 3 为基于归一化基准值加权值的 16 种环境足迹对总环境影响潜值的贡献情况。由图 3 可知,气候变化、化石资源消耗、颗粒物、酸化和光化学臭氧形成 5 种环境足迹的贡献率分别为 38%, 17%, 15%, 8%, 6%, 总值超过了 80%。由此可见,这 5 种环境足迹是值得关注的主要环境影响问题。

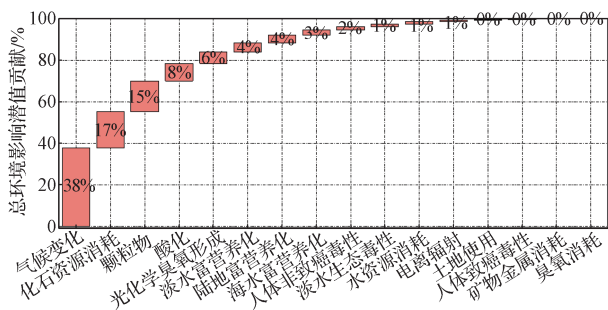


图 3 每功能单位纸浆模塑礼盒生产过程中最相关环境影响类别

Fig. 3 The most relevant environmental impact category per functional unit of pulp molding gift boxes production

### 2.3 过程贡献分析

图 4 为纸浆模塑天地盖礼盒的各生产阶段对气候变化、化石资源消耗、颗粒物、酸化和光化学臭氧形成 5 种环境足迹的贡献情况。热压整形阶段对 5 种环境影响贡献率均超过 80%，因此它是纸浆模塑天地盖礼盒生产生命周期中最相关的阶段。热压整形阶段

消耗了大量的电能,而混合电网的生产消耗是最主要的环境影响过程,与温室气体排放、酸化气体释放以及化石资源消耗等密切相关。

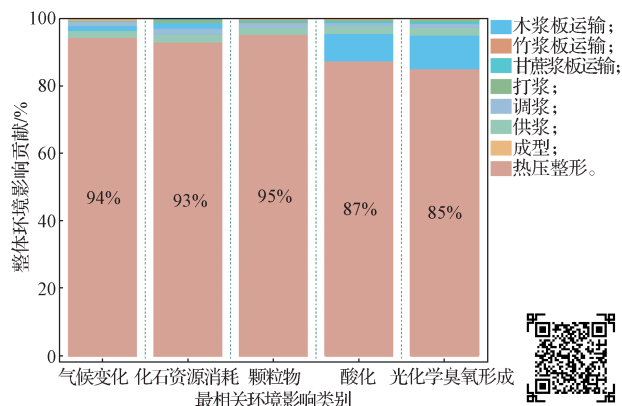


图 4 每功能单位纸浆模塑礼盒生产过程中最相关生命周期阶段

Fig. 4 The most relevant life cycle stage in the production process of pulp molding gift boxes per functional unit

### 2.4 跨数据库 LCA 结果分析

本研究对比了基于 SimaPro 数据库、基于 GaBi 数据库的评价结果,如表 4 所示。除人体致癌毒性、水资源消耗、矿物金属消耗外,其余环境足迹的结果均为 SimaPro 数据库的大于 GaBi 数据库。其中,基于 SimaPro 数据库的碳足迹是基于 GaBi 数据库的 117.91%,而淡水富营养化、臭氧消耗的结果差异尤为明显,这主要与跨数据库中次级数据差异、数据代表性差异等有关。SimaPro 数据库中的电能、蒸汽等主要模型具有较好的中国地区代表性,因此本研究基于 SimaPro 数据库进行生命周期分析。

对表 4 中基于不同数据库的环境影响结果进行标准化和加权分析,结果如图 5 所示。

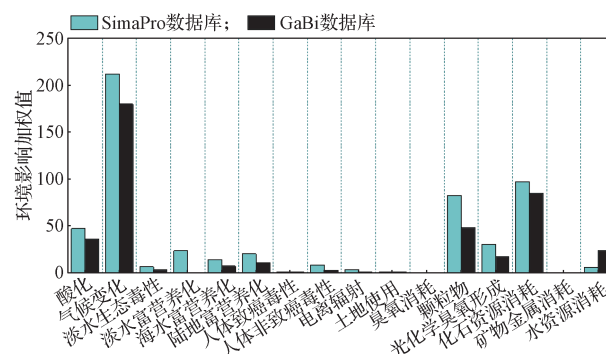


图 5 每功能单位纸浆模塑礼盒环境足迹的跨数据结果对比

Fig. 5 Comparison of cross-data results for the environmental footprint of pulp molding gift boxes per functional unit

表 4 每功能单位纸浆模塑礼盒的跨数据库环境影响结果

Table 4 Environmental impact result of pulp molding gift boxes per functional unit based on cross-database

EF 3.0 环境影响类别	单位	SimaPro 数据库	GaBi 数据库	(SimaPro/GaBi)/%
酸化	mol H <sup>+</sup> eq.	42.67	32.35	131.89
气候变化	kg CO <sub>2</sub> eq.	7609.27	6453.31	117.91
淡水生态毒性	CTUe	20 394.81	11 694.85	174.39
淡水富营养化	kg P eq.	1.38	0.02	5551.22
海水富营养化	kg N eq.	9.56	5.14	186.01
陆地富营养化	mol N eq.	99.19	55.53	178.64
人体致癌毒性	CTUh	1.14 × 10 <sup>-6</sup>	1.55 × 10 <sup>-8</sup>	73.68
人体非致癌毒性	CTUh	6.46 × 10 <sup>-5</sup>	2.25 × 10 <sup>-7</sup>	287.59
电离辐射	kBq U <sup>235</sup> eq.	330.54	104.20	317.22
土地使用	Pt	15 613.25	15 520.53	100.60
臭氧消耗	kg CFC-11 eq.	1.61 × 10 <sup>-5</sup>	2.82 × 10 <sup>-9</sup>	57 134.37
颗粒物	Disease incidences	5.51 × 10 <sup>-4</sup>	3.25 × 10 <sup>-6</sup>	169.30
光化学臭氧形成	kg NMVOC eq.	26.35	15.06	174.96
化石资源消耗	MJ	76 391.61	66 508.16	114.86
矿物金属消耗	kg Sb eq.	2.17 × 10 <sup>-4</sup>	3.12 × 10 <sup>-6</sup>	69.48
水资源消耗	m <sup>3</sup> world eq.	842.25	3258.33	25.85

由图 5 可知，尽管淡水富营养化和臭氧消耗的跨数据库结果差异很明显，但对整体环境影响的贡献均较低。

## 2.5 敏感性分析

### 2.5.1 不同 LCIA 方法的碳足迹结果

图 6 为用 TRACI 2.1、IPCC 2021、CML-IA、ReCiPe 2016 与 EF 3.0 方法评价纸浆模塑天地盖礼盒生产过程的碳足迹结果。

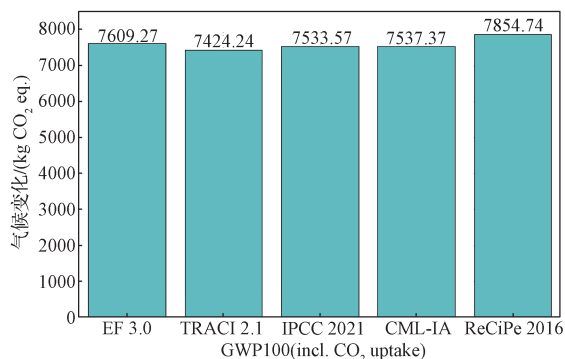


图 6 不同 LCIA 方法的碳足迹结果

Fig. 6 Carbon footprint results for different LCIA methods

不同 LCIA 方法所考虑的地理范畴和单位指标不同<sup>[27]</sup>，例如：EF 3.0、CML-IA 和 ReCiPe 2016 方法是基于欧洲范围的，TRACI 2.1 方法涵盖了北美地区，而 IPCC 2021 是联合国政府间气候变化专门委员会提出的，只考虑气候变化且涉及全球范围；EF 3.0 采

用 mol H<sup>+</sup> eq. 作为酸化的评价指标，而其余三种方法采用 kg SO<sub>2</sub> eq. 的单位指标。然而，对于气候变化这一环境足迹，这五种方法均基于共识的特征化因子，以二氧化碳当量作为参考单位。由图 6 可知，不同 LCIA 方法的碳足迹结果并没有明显差异。

### 2.5.2 电力波动对 LCA 结果影响

从 LCA 分析结果来看，纸浆模塑天地盖礼盒生产过程各生命周期阶段中电能消耗，是最主要的环境影响过程。本研究分析了电能消耗波动 10% 对最相关环境问题的影响，如图 7 所示。由图 7 可知，当电能消耗波动在 10% 以内时，5 种环境足迹的结果也出现了接近 10% 的波动情况，说明了电能消耗量对环境问题的直接相关性和突出贡献，因此减少生产过程中的电能消耗可以有效降低环境影响。

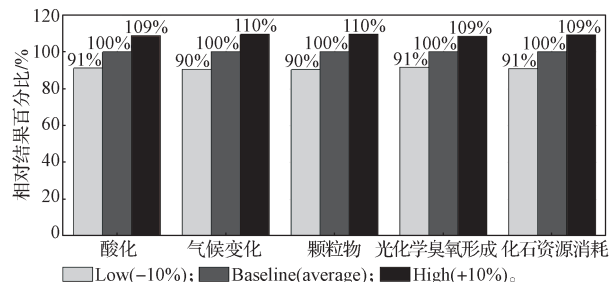


图 7 电能消耗对主要环境影响的敏感性

Fig. 7 Sensitivity of electrical energy consumption to major environmental impacts



### 2.5.3 不同电力类型的影响

本研究分析了不同电力供给结构和形式对纸浆模塑天地盖礼盒生产过程的环境影响。电力供给的背景数据集从 SimaPro 数据库中获取,均选用具有中国天津地区代表性的数据集,包括混合电网、光伏发电、风力发电和水力发电。不同电力类型对最相关环境问题的影响如图 8 所示。由图 8 可知,采用混合电网的能源消耗对 5 种环境足迹的贡献非常明显,采用清洁能源能使每功能单位纸浆模塑天地盖礼盒生产过程中碳排放降低 95% 左右。因此,在实际生产工艺中,通过降低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。

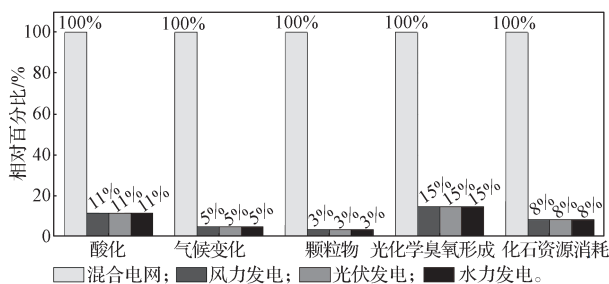


图 8 不同电力类型对主要环境影响的敏感性

Fig. 8 Sensitivity of electricity consumption type to main environmental impacts

## 3 结论

本研究对纸浆模塑天地盖礼盒产品的生产阶段进行生命周期建模,并对环境影响进行特征化、标准化和加权分析。

1) 基于 EF 3.0 生命周期环境影响评价方法得出,生产一万套纸浆模塑制品会消耗 76 391.61 MJ 的化石资源,产生 7609.27 kg CO<sub>2</sub> eq. 的温室气体排放,其中化石能源引起的碳排放占极大比例(7591.24 kg CO<sub>2</sub> eq.)。通过优化设计方案以减少化石资源的使用,或者使用同类的相对低排放的替代资源进行生产。

2) 从生命周期角度来看,气候变化、化石资源消耗、颗粒物、酸化和光化学臭氧形成,是最相关、最值得关注的环境影响问题。环境负荷主要来源于热压整形工序中的较大耗电量。电能消耗是引起环境负担的最相关过程,会直接造成二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、灰尘排放以及硬煤等化石资源的消耗。

3) 从敏感性分析的结果可知,降低电能消耗或使用清洁能源能有效大幅降低整体环境影响问题。比如使用清洁能源可降低 95% 左右的碳排放,可使每

功能单位的纸浆模塑制品生产过程造成的总碳排放由 7609.27 kg CO<sub>2</sub> eq. 降低至 380.46 kg CO<sub>2</sub> eq.。

### 参考文献:

- [1] 黄品歌, 张 艳, 孟 毅, 等. 生物质基天然纤维包装材料的现状及发展趋势 [J]. 包装学报, 2022, 14(5): 66–74.  
HUANG Pingge, ZHANG Yan, MENG Yi, et al. Biomass-Derived Nature Fibers for Packaging Materials: The State-of-the-Art and Future[J]. Packaging Journal, 2022, 14(5): 66–74.
- [2] 张 雪, 张红杰, 程 芸, 等. 纸基包装材料的研究进展、应用现状及展望 [J]. 中国造纸, 2020, 39(11): 53–69.  
ZHANG Xue, ZHANG Hongjie, CHENG Yun, et al. Research Progress, Application Status and Prospect of Paper-Based Packaging Materials[J]. China Pulp & Paper, 2020, 39(11): 53–69.
- [3] 王建民. 植物纤维浆料在纸浆模塑中的应用 [J]. 中国包装, 2022, 42(12): 23–26.  
WANG Jianmin. Application of Plant Fiber Slurry in Pulp Molding[J]. China Packaging, 2022, 42(12): 23–26.
- [4] ZHANG Y L, DUAN C, BOKKA S K, et al. Molded Fiber and Pulp Products as Green and Sustainable Alternatives to Plastics: A Mini Review[J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2022, 7(1): 14–25.
- [5] 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.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境管理 生命周期评价 原则与框架: GB/T 24040—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Frameworks: GB/T 24040—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境管理 生命周期评价 要求与指南: GB/T 24044—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines: GB/T 24044—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

- [8] 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 Lijiang, ZHAO Yu. Life Cycle Assessment of Egg Packaging Production Technology[J]. Packaging Journal, 2021, 13(3): 37-43.
- [9] 吴彤彤, 吴金卓, 王 卉, 等. 缓冲包装材料经济性与环境影响评价研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 17-24.  
WU Tongtong, WU Jinzhuo, WANG Hui, et al. Research Progress on Economy and Environmental Impact Assessment of Buffer Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 17-24.
- [10] 李梦婷. 折叠纸盒的生命周期评价研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2019.  
LI Mengting. Study on the Life Cycle Assessment of Folding Carton[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019.
- [11] 霍李江. 纸浆模塑包装制品的生命周期评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.  
HUO Lijiang. Life Cycle Assessment of Pulp Molded Products[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [12] ZAMPORI L, PANT R. Suggestions for Updating the Product Environmental Footprint (PEF) Method[R]. Strasbourg: Joint Research Centre, 2019: 23-39.
- [13] International Organization for Standardization. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006: 97-132.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] CHEN Z N, DAVIDSON O, HARE B, et al. Climate Change 2007: Synthesis Report[R]. Geneva: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008: 29-71.
- [17] World Meteorological Organization. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014[M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2014: 59-68.
- [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] 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.
- [20] 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.
- [21] van ZELM R, HUIJBREGTS M A J, den HOLLANDER 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.
- [22] 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[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(6): 403-416.
- [23] MORELLI B, HAWKINS T R, NIBLICK B, et al. Critical Review of Eutrophication Models for Life Cycle Assessment[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(17): 9562-9578.
- [24] de LAURENTIIS V, SECCHI M, BOS U, et al. Soil Quality Index: Exploring Options for a Comprehensive Assessment of Land Use Impacts in LCA[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 63-74.
- [25] BOULAY A M, BARE J, BENINI L, et al. The WULCA Consensus Characterization Model for Water Scarcity Footprints: Assessing Impacts of Water Consumption Based on Available Water Remaining (AWARE)[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, 23(2): 368-378.
- [26] van OERS L, GUINÉE J B, HEIJUNGS R. Abiotic Resource Depletion Potentials (ADPs) for Elements Revisited—Updating Ultimate Reserve Estimates and Introducing Time Series for Production Data[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020, 25(2): 294-308.
- [27] MARANHI S, BRONDI C. Life Cycle Assessment in the Chemical Product Chain Challenges, Methodological Approaches and Applications: Challenges, Methodological Approaches and Applications[M]. Berlin: Springer, 2020: 33-48.

(责任编辑: 邓 彬)

附表1 每功能单位纸浆模塑礼盒生产过程的环境影响结果

Schedule 1 Environmental impact results per functional unit of pulp molding gift boxes in production process

环境足迹类型	单位	甘蔗浆板运输	木浆板运输	竹浆板运输	打浆	调浆	供浆	成型	热压整形	烘干	切边	成品装箱	总计
酸化	mol H <sup>+</sup> eq.	0.32	3.46	0.01	0.22	0.42	0.86	0.07	36.31	0.01	0.02	0.95	42.67
气候变化	kg CO <sub>2</sub> eq.	10.48	110.26	12.06	41.89	84.57	164.89	13.04	6948.96	2.82	4.05	216.26	7609.27
淡水生态毒性	CTUe	61.83	650.88	70.34	103.83	559.82	407.76	32.25	17 184.33	6.96	10.02	1306.79	20 394.81
淡水富营养化	kg P eq.	$6.32 \times 10^{-5}$	$6.64 \times 10^{-4}$	$8.18 \times 10^{-5}$	$7.66 \times 10^{-3}$	$1.56 \times 10^{-2}$	$2.89 \times 10^{-2}$	$2.29 \times 10^{-3}$	1.22	$4.94 \times 10^{-4}$	$7.10 \times 10^{-4}$	$1.10 \times 10^{-1}$	1.38
海水富营养化	kg N eq.	$8.18 \times 10^{-2}$	$8.77 \times 10^{-1}$	$3.67 \times 10^{-3}$	$4.80 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^{-1}$	$1.84 \times 10^{-1}$	$1.45 \times 10^{-2}$	7.752	$3.14 \times 10^{-3}$	$4.52 \times 10^{-3}$	$4.88 \times 10^{-1}$	9.56
陆地富营养化	mol N eq.	0.90	9.71	0.04	0.50	0.87	1.95	0.15	82.14	0.03	0.05	2.85	99.19
人体致癌毒性	CTUh	$1.53 \times 10^{-9}$	$1.63 \times 10^{-8}$	$7.05 \times 10^{-10}$	$6.57 \times 10^{-9}$	$1.68 \times 10^{-8}$	$2.42 \times 10^{-8}$	$1.92 \times 10^{-9}$	$1.02 \times 10^{-6}$	$4.15 \times 10^{-10}$	$5.95 \times 10^{-10}$	$4.66 \times 10^{-8}$	$1.14 \times 10^{-6}$
人体非致癌毒性	CTUh	$2.64 \times 10^{-8}$	$2.70 \times 10^{-7}$	$7.25 \times 10^{-8}$	$3.80 \times 10^{-7}$	$8.40 \times 10^{-7}$	$1.43 \times 10^{-6}$	$1.13 \times 10^{-7}$	$6.03 \times 10^{-5}$	$2.45 \times 10^{-8}$	$3.51 \times 10^{-8}$	$1.20 \times 10^{-6}$	$6.46 \times 10^{-5}$
电离辐射	kBq U <sup>235</sup> eq.	0.03	0.29	0.06	1.79	2.88	7.05	0.56	297.01	0.12	0.17	20.59	330.54
土地使用	Pt	0.18	1.89	0.30	43.54	68.43	169.93	13.44	7161.23	2.90	4.17	8147.24	15 613.25
臭氧消耗	kg CFC-11 eq.	$1.59 \times 10^{-7}$	$1.66 \times 10^{-6}$	$2.59 \times 10^{-7}$	$4.81 \times 10^{-8}$	$1.04 \times 10^{-6}$	$1.88 \times 10^{-7}$	$1.49 \times 10^{-8}$	$7.93 \times 10^{-6}$	$3.21 \times 10^{-9}$	$4.62 \times 10^{-9}$	$4.81 \times 10^{-6}$	$1.61 \times 10^{-5}$
颗粒物	Disease incidences	$2.56 \times 10^{-7}$	$2.64 \times 10^{-6}$	$6.01 \times 10^{-7}$	$3.08 \times 10^{-6}$	$7.55 \times 10^{-6}$	$1.21 \times 10^{-5}$	$9.60 \times 10^{-7}$	$5.11 \times 10^{-4}$	$2.07 \times 10^{-7}$	$2.98 \times 10^{-7}$	$1.15 \times 10^{-5}$	$5.51 \times 10^{-4}$
光化学臭氧形成	kg NMVOC eq.	0.24	2.57	0.03	0.13	0.31	0.51	0.04	21.59	0.01	0.01	0.91	26.35
化石能源消耗	MJ	129.13	1357.11	159.40	405.54	1429.92	1596.13	126.24	67 265.83	27.25	39.21	3855.85	76 391.61
矿物金属消耗	kg Sb eq.	$1.19 \times 10^{-7}$	$1.20 \times 10^{-6}$	$4.12 \times 10^{-7}$	$9.90 \times 10^{-7}$	$2.02 \times 10^{-6}$	$3.84 \times 10^{-6}$	$3.04 \times 10^{-7}$	$1.62 \times 10^{-4}$	$6.56 \times 10^{-8}$	$9.43 \times 10^{-8}$	$4.56 \times 10^{-5}$	$2.17 \times 10^{-4}$
水资源消耗	m <sup>3</sup> world eq.	0.11	1.19	0.15	83.55	1114.08	17.68	-1211.62	734.99	0.30	0.43	101.39	842.25



## Environmental Impact Analysis of Pulp Molding Gift Boxes Based on Life Cycle Assessment

LI Fuyin<sup>1,2</sup>, ZHANG Nuan<sup>1</sup>, LIN Qinbao<sup>1</sup>, YANG Qinghua<sup>3</sup>, WEI Jielu<sup>1</sup>

( 1. College of Packaging Engineering, Jinan University, Zhuhai Guangdong 519070, China;

2. Zhongrong Printing Group (Zhongshan) Co., Ltd., Zhongshan Guangdong 528403, China;

3. Zhili Technology (Guangdong) Co., Ltd., Guangzhou 510000, China )

**Abstract:** SimaPro software and the Ecoinvent database were used to model the life cycle of pulp molding gift box production, and the EF 3.0 method was used to analyze the environmental impacts of life cycle, to quantify and identify the environmental footprints of the production process and its contributing processes, and to assess and explain its environmental impacts. The results show that the climate change impacts caused by the production of 10 000 sets of pulp molding gift boxes is 7609.27 kg CO<sub>2</sub> eq., with 7591.24 kg CO<sub>2</sub> eq. caused by fossil resources. Climate change, fossil resource depletion, particulate emissions, acidification, and photochemical ozone formation are the main environmental impact categories in the production process of pulp molding gift boxes, with a cumulative contribution of more than 80% of the overall environmental impacts, among which, the thermo-compression shaping process and its electrical energy consumption are the main causes of environmental problems. Through sensitivity analysis of the results, reducing the amount of electrical energy consumed in the production process or using cleaner energy alternatives could reduce the carbon footprint by up to about 95% and lower the overall environmental impact.

**Keywords:** pulp molding gift box; life cycle assessment (LCA); SimaPro; GaBi; carbon footprint

( 上接第 27 页 )

## Influence of Nitrogen Flow Rate on Microstructure and Properties of Titanium Nitride Coatings

LI Jianzhi, LI Wenyuan, PAN Xu, LUO kan, DING Zeliang

( College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China )

**Abstract:** Titanium nitride coatings were prepared on Ti6Al4V titanium alloy via DC reactive sputtering technology at different nitrogen flow rates. The coating was characterized by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scratch tester, and electrochemical workstation to investigate the influence of nitrogen flow rate on the coating's microstructure and properties. Results indicate that at 0.3 mL/min nitrogen flow rate, the coating exhibits an amorphous structure, while at 0.5~3.5 mL/min, there is a titanium nitrogen oxide crystal phase. As the nitrogen flow rate increases, the N element content in the coating decreases, the O element content increases, the coating thickness decreases, and the density, interface bonding, and corrosion resistance are enhanced.

**Keywords:** Ti6Al4V; DC reactive sputtering; titanium nitride coating; adhesion; corrosion resistance