

## 淀粉基食品包装材料的生命周期评价

王艳丽<sup>1</sup>, 李玉坤<sup>1</sup>, 支朝晖<sup>2</sup>, 金征宇<sup>1</sup>, 缪铭<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>江南大学食品科学与技术国家重点实验室 江苏无锡 214122

<sup>2</sup>常州龙骏天纯环保科技有限公司 江苏常州 213003)

**摘要** 为了比较石油基材料和淀粉基材料的环境绩效,采用生命周期评价(LCA)方法分析两种材料对环境指标的影响,以及在原材料获取阶段、产品生产阶段的碳排放当量。通过环境评估软件,建立两种材料的生命周期评估模型。结果表明,淀粉基材料对环境的主要影响指标如气体排放、能耗和水耗均比纯石油基聚丙烯明显减少了 27.79%,27.55%,21.29%;碳排放当量在原材料获取阶段影响最大,其次是产品生产阶段。说明选取淀粉基代替材料设计食品包装能有效减轻环境污染,助力双碳目标实现。

**关键词** 生命周期评价; 淀粉基材料; 食品包装; 环境影响

**文章编号** 1009-7848(2021)12-0277-06 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2021.12.030

随着新兴行业,如外卖、快递的蓬勃发展,人们越来越关注包装行业对环境的影响,尤其是食品包装。我国允许使用的食品包装材料较多,其中塑料因可塑性强、生产成本低、质量轻等优势,在食品包装领域被广泛使用<sup>[1]</sup>。据统计,我国每年塑料树脂产量超过 1 000 万 t,塑料制品更是超过 1 100 万 t,已成为世界第三塑料大国<sup>[2]</sup>。巨量的不可降解塑料给环境造成了严重的“白色污染”,且由于塑料的生产原料主要为石油,也引发了能源危机,因此发展生物降解塑料(主要是淀粉基化合物或聚乳酸材料)替代传统石油基塑料已成为趋势<sup>[3]</sup>。与石油基材料相比,生物基材料来源广泛,可降解,既可缓解能源危机,同时废弃包装掩埋后也能被微生物分解为无机物,不会造成环境污染<sup>[4]</sup>。我国从 2008 年发布“限塑令”到 2019 年将生物基塑料列入鼓励类产业目录,这一系列政策均表明中国对生物基塑料需求保持较高的稳定增长趋势<sup>[5]</sup>。而国外方面,欧美、日、韩等国家注重环保,对于可降解材料的消耗加大,尤其是欧洲<sup>[6]</sup>。据统计,2020 年生物降解材料的全球使用量将达到 320 万 t,其中欧美是生物降解材料的主要市场,而亚

洲是未来生物降解材料的主要增长区<sup>[7]</sup>。然而,国内外生物可降解塑料的价格通常比传统塑料制品高出 1 倍以上,其中完全可降解塑料的价格甚至高出 4~8 倍<sup>[8]</sup>。高昂的价格限制了许多可降解塑料的应用。降低价格、提高性能将是未来生物可降解塑料发展的主要趋势。以淀粉、植物秸秆等为来源或原料的生物基高分子材料,不仅具有良好的力学性能,而且具有优良的生物可降解性能,同时成本低廉,丰富易得,逐渐受到市场青睐<sup>[9-10]</sup>。然而,制备淀粉基材料过程涉及许多方面,包括对环境的影响。寻找一种系统科学的评估方法至关重要。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种能够客观分析与评价资源和环境影响的环境管理技术,包括从原材料的采集、加工、生产、包装、运输、消费、回收以及最终处理等阶段<sup>[11-14]</sup>。近年来,在与传统石油基材料的对比研究中,LCA 被广泛用于分析生物基材料的环境性能。Leceta 等<sup>[15]</sup>评估了壳聚糖基薄膜对环境的影响,结果表明,尽管壳聚糖薄膜在薄膜制造阶段引起较高的环境负荷,而在原材料提取和最终处理阶段,还表现出非常积极的环境影响,从而减少了食品包装行业产生的环境污染。Chen 等<sup>[16]</sup>研究了 100%生物基聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)瓶与完全石油基和部分生物基 PET 瓶的环境生命周期评价分析,结果表明,与石油基的同类产品相比,木质生物基 PET 瓶可减少 21%的全球变暖潜能,并减少 22%的石油燃料,而在其它类别(如生态毒性和臭氧消耗影

收稿日期: 2020-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1603204); 国家粮食行业重大急需关键项目; 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)2022)

作者简介: 王艳丽(1991—),女,博士生

通信作者: 缪铭 E-mail: miaoming@jiangnan.edu.cn

响)方面表现较差。

本研究的目的是对不同配方的淀粉基材料进行环境评价,并将其环境负荷与传统的石油基材料聚丙烯(PP)进行比较。基于该环境评估结果,本研究旨在为可持续发展决策提供理论参考,促使食品包装行业甚至整个产业链的行为更符合绿色发展的要求,从而最大程度地减少环境影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

本研究中淀粉基材料生产来自河北某公司,主要数据来源于代表企业及供应链。生产的工艺为:原材料获取→运输→高速混合→挤出造粒。本次 LCA 评价对使用 3 个配方的生物基材料,与作为参照系的纯石油基聚丙烯(PP)生产的材料进行对比分析,配方和参照系信息见表 1。

表 1 配方和参照系清单数据表

Table 1 Process data list of formula and reference

类型	清单名称	数量				单位
		参照系	配方 1	配方 2	配方 3	
产品	生物基材料	0	1	1	1	kg
消耗	聚丙烯	1	0.52	0.42	0.32	kg
消耗	淀粉	0	0.45	0.55	0.65	kg
消耗	滑石粉	0	0.03	0.03	0.03	kg
消耗	电力	0.96	0.96	0.96	0.96	kWh

本研究中滑石粉来自广西某公司,其过程数据来源同样来自代表企业及供应链,淀粉基材料生产过程清单数据见表 2。

本研究中的所有运输均使用 18 t 重型载重货车(柴油),淀粉原料为河北秦皇岛城内运输,运输距离为  $1.119 \times 10^3$  km;聚丙烯原料由山东运往河北,运输距离为 544 km;滑石粉由广西运往河北,运输距离为  $2.114 \times 10^3$  km。

表 2 滑石粉生产过程清单数据

Table 2 Process data list of talc

类型	清单名称	数量	单位
产品	滑石粉	1	kg
消耗	滑石	1	kg
消耗	水	0.038	kg
消耗	电力	0.04	kWh

### 1.2 研究方法

1.2.1 目标定义 本研究的研究对象为 BSRM<sup>®</sup> PLANT MASS 系列淀粉基材料,选用不同配比的淀粉基材料进行生命周期评价,并与纯石油基材料作对比,突出淀粉基材料的环境绩效。

1.2.2 范围定义 本研究生命周期评价涉及的主要流程有原材料获取、原材料的运输、不同配料的共混改性、制造淀粉基母料的一系列过程。图 1 为淀粉基一次性餐饮具的生产工艺,本研究的系统边界为生命周期-生产阶段(从摇篮到大门),即虚线框部分。

1.2.3 功能单位界定 LCA 中的功能单位是量化产品系统输出功能时所采用的单位。只有系统的输入输出功能单位一致,不同产品系统的环境性能数据才有可比性。本研究的功能单位为 1 kg 淀

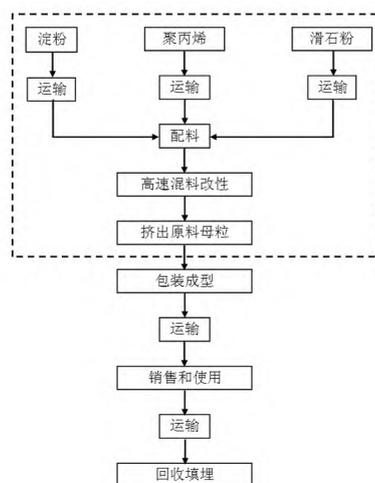


图 1 淀粉基母料的系统边界

Fig.1 System boundaries for starch-based materials

粉基材料。

#### 1.2.4 环境影响类型

本研究选择了 9 种环境影

响类型指标进行了计算,见表 3。其中气候变化,初级能源消耗和水资源消耗比较具有代表性。

表 3 环境影响类型指标

Table 3 Environmental impact type indicators

环境影响类型指标	影响类型指标单位	主要清单物质
气候变化(GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq.	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O...
初级能源消耗(PED)	MJ	硬煤,褐煤,天然气...
水资源消耗(WU)	kg	淡水,地表水,地下水...
非生物资源消耗(ADP)	kg Sb eq.	铁,锰,铜...
臭氧层消耗(ODP)	kg CFC <sub>-11</sub> eq.	CCl <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> Br...
富营养化-淡水(EP)	kg N eq.	NH <sub>4</sub> -N...
酸化(AP)	mol H <sup>+</sup> eq.	SO <sub>2</sub> , NOX, NH <sub>3</sub> ...
可吸入无机物(RI)	kg PM <sub>2.5</sub> eq.	CO, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> ...
光化学臭氧合成(POFP)	kg NMVOC eq.	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ...

1.2.5 LCA 计算与分析工具 本研究采用由亿科开发的 中国生命周期基础数据库 (CLCD) 系统,建立了生物基材料 LCA 模型。CLCD 数据库包括国内主要能源、交通运输和基础原料的清单数据集。

## 2 生命周期影响结果与分析

### 2.1 LCA 结果

本研究的环境影响评价依据生命周期评价理论,在 eFootprint 上建模计算得不同配方淀粉基材料与石油基材料的 LCA 计算结果,计算指标分别为 GWP、PED、WU、ADP、AP、EP、ODP、RI、POFP。表 4 为两种材料的 LCA 结果。

表 4 石油基及不同配方淀粉基材料的 LCA 结果

Table 4 LCA results of fossil-based materials and starch-based materials with different formulations

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA 结果			
		参照系	配方 1	配方 2	配方 3
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	4.109	3.296	3.131	2.967
PED	MJ	83.378	66.921	63.666	60.411
WU	kg	15.993	13.531	13.059	12.588
ADP	kg Sb eq.	2.051×10 <sup>-5</sup>	1.795×10 <sup>-5</sup>	1.749×10 <sup>-5</sup>	1.703×10 <sup>-5</sup>
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	0.016	0.016	0.016	0.016
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	0.002	0.005	0.006	0.007
ODP	kg CFC <sub>-11</sub> eq.	4.89×10 <sup>-7</sup>	3.055×10 <sup>-7</sup>	2.675×10 <sup>-7</sup>	2.295×10 <sup>-7</sup>
RI	kg PM <sub>2.5</sub> eq.	0.006	0.005	0.004	0.004
POFP	kg NMVOC eq.	0.008	0.006	0.006	0.005

由上表 LCA 分析结果可知,GWP、PED、ADP、WU、ODP 分析指标与配方中聚丙烯(PP)含量呈正相关,含量越高,指标数值越大。这 5 个指标比参照系分别降低了 27.79%,27.55%,16.97%,21.29%,53.07%,表明淀粉基配方对环境的气候变化,初级能源、非生物资源、水资源及臭氧层消耗等环境影响明显优于纯 PP 配方。此外,各配方

EP 值与淀粉含量呈正相关,淀粉基配方比纯 PP 增加了 2.5%。AP 值不受 PP 和淀粉含量影响,因为该指标主要与电力消耗相关。而从 RI、POFP 值的大小来看,不能判断 PP 含量对结果的影响。

为了比较两种材料的环境影响评价,本研究同时计算了纯石油基材料及 3 种淀粉基材料的 LCA。采用 eFootprint 软件计算,背景数据库一致。

不同包装材料的主要环境指标对比见图2。LCA结果显示,3种淀粉基材料的气体排放值(GWP)、初级能耗值(PED)、水耗(WU)等主要指标均低于石油基材料,GWP由4.109减小至2.967,PED由

83.378减小至60.411,WU由15.993减小至12.588。综上结果表明,3种淀粉基材料比该石油基材料对环境造成的负荷要小。

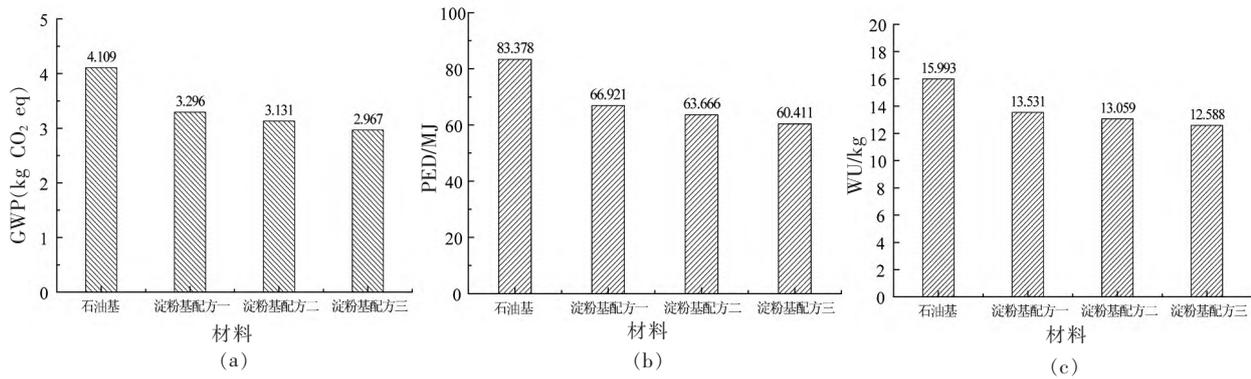


图2 不同材料的主要环境指标对比

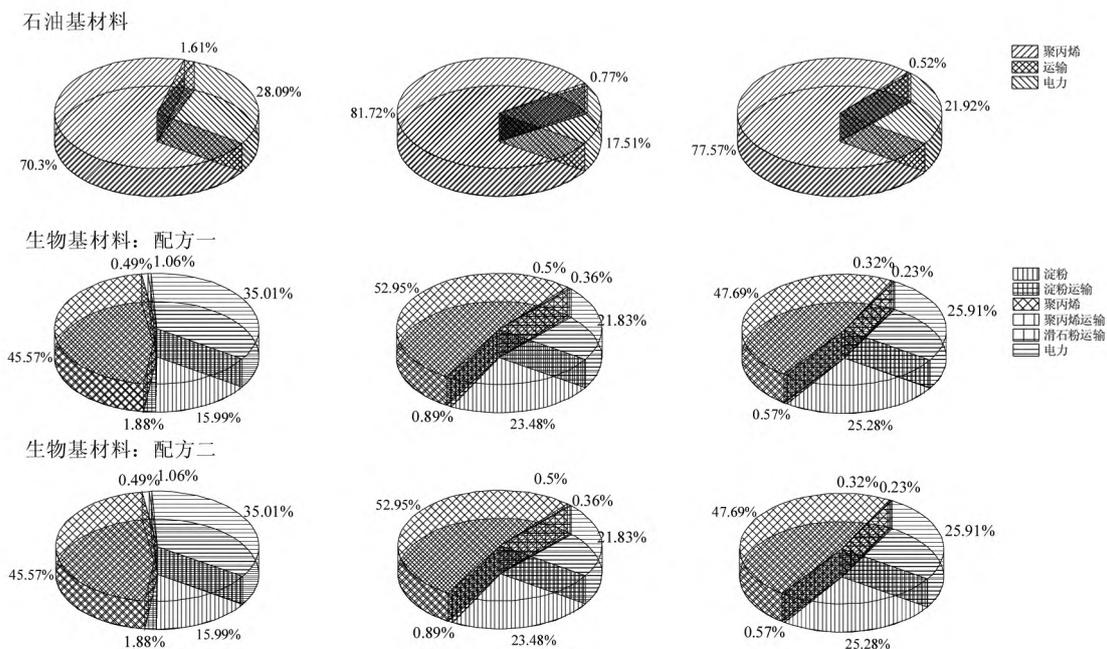
Fig.2 Comparison of life cycle environmental load of different materials

### 2.2 过程累积贡献分析

过程累积贡献是指该过程直接贡献及其所有上游过程的贡献(即原料消耗所贡献)的累加值。由于过程通常是包含多条清单数据,所以过程贡献分析其实是多项清单数据灵敏度的累积。

由图3可知,纯石油基材料生命周期的主要环境指标中,聚丙烯对GWP、PED和WU的贡献均较大,分别是70.3%,81.72%和77.57%,其次是电力,分别为28.09%,17.51%,21.92%。而不同配方

的淀粉基材料生命周期的主要环境指标中,聚丙烯、淀粉和电力对GWP、PED和WU的贡献均较大,且随着淀粉含量的增加,聚丙烯对环境的不利影响各减少了14.4%,16.85%,16.13%。从以上各环境指标构成情况来看,要提升这两种材料的环境绩效,最重要的是减少聚丙烯的添加量,以淀粉取代聚丙烯,从而提高环境绩效;其次是电力和淀粉原料,由于生物基配方以淀粉为主,因此其对环境累积贡献逐渐增大。



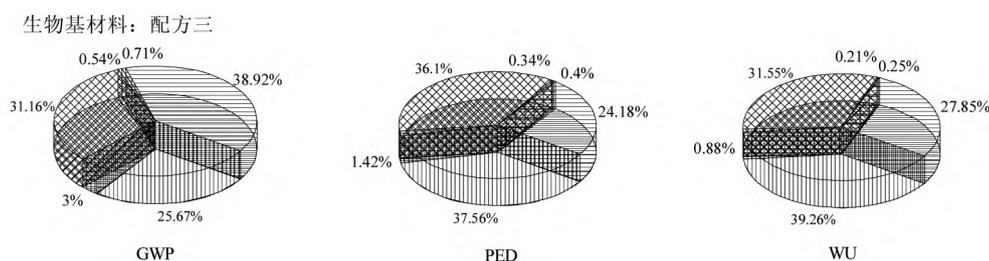


图 3 石油基材料和不同配方的淀粉基材料 LCA 累积贡献结果

Fig.3 The LCA cumulative contribution of fossil-based materials and starch-based materials with different formulations

### 2.3 不同配方淀粉基材料与石油基材料的碳排放比较

通过对不同配方淀粉基材料与石油基材料的原材料获取、产品生产两个阶段进行碳排放分析,在每个阶段中均以 1 kg 产品为标准建立了它们的环境绩效评估模型,得到了两种材料在这两个阶段的碳排放当量。由图 4 可知,这两种材料在原材料获取、产品生产两个过程中,其碳排放当量环境影响主要在原材料获取阶段,其次分别是产品生产阶段。因此必须改善原材料获取阶段的碳排放,才能减少环境负荷。由于原材料获取阶段主要消耗的是聚丙烯和淀粉,随着淀粉基配方中淀粉含量的增加,原材料获取阶段碳排放比例明显下降,说明淀粉基配方可有效减少环境负担,比聚丙烯更有优势。

## 3 结论

使用环境影响评估软件对纯石油基材料和不同配方的淀粉基材料进行了生命周期评价,结果表明,淀粉基配方对环境气候变化、初级能源、非生物资源、水资源及臭氧层消耗等环境影响指标明显优于纯 PP 配方,分别降低了 27.79%, 27.55%, 16.97%, 21.29%, 53.07%。在过程累积贡献分析中,以淀粉取代聚丙烯后,对环境主要指标的不利影响各减少了 14.4%, 16.85%, 16.13%。此外,对两种材料的两个阶段进行了碳排放分析,原材料获取阶段碳排放当量最多,聚丙烯达到 81.76%,因此可选用更环保的材料替换。采用淀粉替代部分聚丙烯后,不同淀粉基配方的碳排放当量最大可降低 20.66%。综上,3 种淀粉基材料的主要环境绩效表现均要优于石油基材料,展现了淀粉

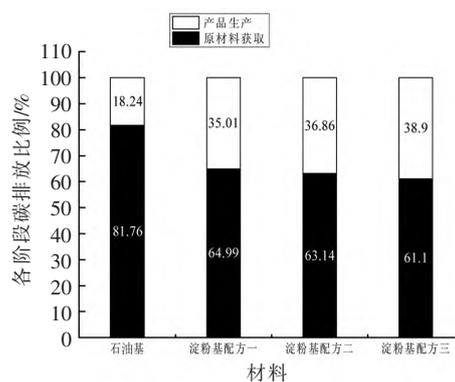


图 4 不同配方淀粉基材料与石油基材料的碳排放

Fig.4 Carbon emission equivalent of fossil-based materials and starch-based materials with different formulations

基材料的优势。当前针对国家“双碳”战略目标和“白色污染”环境问题,国内外已经出台了各项政策限制甚至禁止传统塑料,以支持生物降解塑料的发展。因此,开发淀粉基替代材料将对发展国内生物基材料产业具有重要的引领作用。

## 参 考 文 献

- [1] 张思梦, 查金, 孟伟, 等. 环境中的微塑料及其对人体健康的影响[J]. 中国塑料, 2019, 33(4): 81-88.
- [2] 金征宇, 王禹, 李晓晓, 等. 淀粉基生物可降解材料的研究进展[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 1-7.
- [3] PAWELZIK P, CARUS M, HOTCHKISS J, et al. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials - Reviewing methodologies and deriving recommendations[J]. Resources, Conser-

- vation and Recycling, 2013, 73: 211-228.
- [4] LECETA I, ETXABIDE A, CABEZUDO S, et al. Bio-based films prepared with by-products and wastes: environmental assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 64(Feb.1): 218-227.
- [5] 前瞻网. 2019年生物基塑料行业市场现状与发展前景: 生物降解塑料存在巨大替代市场空间[EB/OL]. (2019-10-31)[2020-08-07]. [http://www.polymer.cn/polymernews/2019-10-31/\\_20191031142824816.htm](http://www.polymer.cn/polymernews/2019-10-31/_20191031142824816.htm).
- [6] 潘博, 贾雪, 支朝晖, 等. 复合改性淀粉膜材料工艺优化与性能分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 156-163.
- [7] 生物可降解材料成为未来五年市场主力军[EB/OL]. (2016-03-16)[2020-08-07]. [http://www.polymer.cn/polymernews/2019-10-31/\\_20191031142824816.htm](http://www.polymer.cn/polymernews/2019-10-31/_20191031142824816.htm).
- [8] 李亚儒, 陈康. 热塑性淀粉研究现状与展望[J]. 广州化工, 2018, 46(16): 33-35.
- [9] 韩国程, 郭蕊, 俞朝晖. 淀粉基生物降解薄膜材料的研究进展[J]. 生物加工过程, 2019, 17(5): 460-465.
- [10] 林川, 罗仁勇, 陈远文, 等. 淀粉基可降解材料研究现状[J]. 农产品加工, 2019, 478(8): 78-80.
- [11] BOHLMANN G M. Biodegradable packaging life-cycle assessment[J]. Environmental Progress, 2004, 23(4): 342-346.
- [12] 王鑫婷, 方芳, 朱仁高, 等. 包装产品的全生命周期评价[J]. 绿色包装, 2019(8): 51-54.
- [13] 尹芬, 马晓军. 空气缓冲包装袋的生命周期评价研究[J]. 上海包装, 2017(6): 67-70.
- [14] 梁韵秋, 孔钰晨, 蔡静蕊, 等. 瓷质餐具聚苯乙烯包装生命周期评价案例分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S2): 396-401.
- [15] LECETA I, GUERRERO P, CABEZUDO S, et al. Environmental assessment of chitosan-based films[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41 (Feb.): 312-318.
- [16] CHEN L, PELTON R E O, SMITH T M. Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137(Nov. 20): 667-676.

## Comparative Life Cycle Assessment of Starch-based Food Packaging Materials

Wang Yanli<sup>1</sup>, Li Yukun<sup>1</sup>, Zhi Chaohui<sup>2</sup>, Jin Zhengyu<sup>1</sup>, Miao Ming<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

<sup>2</sup>Changzhou Longjun Skypurl Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changzhou 213003, Jiangsu)

**Abstract** In order to compare the environmental performance of fossil-based materials and starch-based materials with different formulations, the life cycle assessment (LCA) method was used to analyze the impact of the two materials on environmental indicators, as well as the carbon emission equivalents during the raw material acquisition stage and product production stage. Through the environmental assessment software, the life cycle assessment models of the two materials are established. The results show that the main environmental impact indicators of starch-based materials such as gas emissions, energy consumption and water consumption are significantly reduced by 27.79%, 27.55% and 21.29% compared to pure fossil-based polypropylene; the carbon emission equivalent has the greatest impact during the raw material acquisition stage, the second is the product production stage. Therefore, choosing starch instead of polypropylene can effectively reduce environmental pollution for peaking carbon dioxide emissions by 2030 and achieving carbon neutrality by 2060.

**Keywords** life cycle assessment; starch-based materials; food packaging; environmental impact