

三类典型一次性外卖餐盒的全生命周期评价

李德祥¹, 叶蕾², 支朝晖², 金征宇¹, 缪铭^{1,2*}

(1. 江南大学食品与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122)

(2. 江苏龙骏环保实业发展有限公司, 江苏常州 213003)

摘要: 基于食品加工安全和生态环境防治, 该文采用生命周期评价(LCA)方法对以聚丙烯(PP)、聚乳酸(PLA)和热塑性淀粉(TPS)为原料的一次性外卖餐盒进行环境影响指标评估, 并比较原料获取阶段(摇篮到门)、制品生产阶段(门到门)、废弃物处理阶段(门到坟墓)的碳排放当量和能源消耗参数。以1000个一次性外卖餐盒为基准流, 利用环境评估软件建立了一次性塑料餐盒从摇篮到坟墓全生命周期评估模型。其中, 三类典型塑料餐盒的碳排放当量在原材料获取和废弃物处理阶段最大, 而资源和能源消耗则主要发生在原材料获取和产品生产阶段。TPS餐盒累计释放98.84 kg CO₂, 消耗679.02 MJ能源, 与PP和PLA餐盒相比碳排放低46.90%、28.30%, 节省能源4270.94 MJ、615.2 MJ。因此在餐饮外卖领域推广使用TPS替代制品可有效治理一次性塑料餐盒环境污染。

关键词: 热塑淀粉; 聚乳酸; 聚丙烯; 餐盒; 生命周期评价

文章编号: 1673-9078(2022)01-233-237

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.1.1027

Life Cycle Assessment of Three Typical Disposable Plastic Takeout Boxes

LI Dexiang¹, YE Lei², ZHI Zhaohui², JIN Zhengyu¹, MIAO Ming^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

(2. Jiangsu Longjun Environmental Protection Industrial Development Co. Ltd., Changzhou 213003, China)

Abstract: Based on the need for food processing safety and improving ecological environment control, life cycle assessment (LCA) was performed to evaluate the environmental impact index of disposable takeout boxes made from polypropylene (PP), polylactic acid (PLA), and thermoplastic starch (TPS). The carbon dioxide equivalent (CO₂e) and energy consumption parameters of the raw material extraction stage (cradle-to-gate), manufacturing stage (gate-to-gate), and waste treatment stage (gate-to-grave) were compared. Environmental assessment software was employed to establish a cradle-to-grave LCA model of disposable plastic takeout boxes, with 1000 disposable takeout food boxes as the benchmark flow. The CO₂e of the three typical plastic takeout food boxes was the largest at the raw material extraction and waste disposal stages. The raw material extraction and product manufacturing stages consumed the most resources and energy. Carbon emission and energy consumption were 98.84 kg and 679.02 MJ, respectively, for TPS boxes. Compared with takeout boxes made from PP and PLA, TPS boxes exhibited 46.90% and 28.30% lower carbon emission and 4270.94 MJ and 615.2 MJ lower energy consumption, respectively. Hence, the use of TPS-based substitutes in takeout catering could effectively reduce environmental pollution.

Key words: thermoplastic starch; polylactic acid; polypropylene; takeout food boxes; life cycle assessment

引文格式:

李德祥, 叶蕾, 支朝晖, 等. 三类典型一次性外卖餐盒的全生命周期评价[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 233-237, +28

LI Dexiang, YE Lei, ZHI Zhaohui, et al. Life cycle assessment of three typical disposable plastic takeout boxes [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 233-237, +28

近年来, 网络电商和餐饮外卖行业的快速发展给人们的生活带来了极大的便利, 但造成的污染问题也

收稿日期: 2021-09-14

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: 李德祥(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉基降解材料, E-mail: 6200113182@stu.jiangnan.edu.cn

通讯作者: 缪铭(1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 淀粉结构与功能,

E-mail: miaoming@jiangnan.edu.cn

逐渐凸显, 引起了社会广泛关注。据统计, 国内四大网络订餐平台每天销售2000万份外卖, 每单消耗2个一次性餐盒共需超4000万个(1年146亿个), 每单消耗1个塑料袋(按0.06 m²计), 每天所用塑料袋可覆盖1.20×10⁶ m²; 每年茶饮塑料吸管约4.60×10¹⁰根(3×10⁴ t); 每年产生一次性餐盒和塑料袋废弃垃圾2.0×10⁶ t以上。大量一次性塑料餐盒垃圾不仅消耗不可再生资源且难降解, 掩埋或焚烧的废弃物处理方式将造成土地、水和空气污染, 严重威胁生态环境和人

类健康^[1,2]。塑料树脂极易在接触食品后发生组分迁移,通过饮食不断在人体内蓄积,进而产生各种毒性效应危害健康,如塑料微粒经过食物链层层传递进入人体。同时,为了提升加工适应性,树脂加工常添加双酚类、聚酯类、环氧酯类增塑剂,也容易引发食品安全问题。为了应对塑料白色污染,“限塑”刻不容缓,全球各国不断推出“限塑”政策。欧盟 2021 年颁布“禁塑令”,禁止或限用棉签棒、吸管等十种一次性塑料制品;法国禁止使用一次性餐盒,并要求碗、碟、杯、叉等一次性餐盒必须用基于生物的原料制作;2020 年我国政府发布《关于进一步加强塑料污染治理的意见》和“双碳”战略目标,有力有序有效治理塑料污染,努力建设美丽中国。随着绿色环保材料的不断发展,聚乳酸、热塑淀粉等材料不仅具有优良生物可降解性能,而且拥有良好的物理机械加工性能,成为一次性塑料餐盒研发的主要替代产品^[3-6]。本文采用生命周期评价(LCA)对生物降解材料聚乳酸、热塑淀粉进行环境风险评价,并将其碳排放当量和能源消耗参数与聚丙烯(PP)进行比较。基于该环境评估结果,对外卖餐饮行业的食品餐盒包装的绿色加工、可持续设计提供参考,使产业链的行为更符合绿色发展的原则,最大程度地减少环境影响。

1 材料与方法

1.1 方法及评价标准

LCA 方法涉及对功能单元开发中从摇篮到坟墓所有流程的考虑。一次性餐盒生命周期包含以下三个阶段:原料的提以及塑料母粒生产、餐盒生产加工、餐盒的使用和废弃。LCA 的主要目的是确定产品整个

生命周期的整体能源、材料、废物和排放影响,以及确定间接环境影响的分析^[7,8]。

1.2 功能单元和系统边界

1.2.1 功能单元

以 1000 个容量为 650 mL 的一次性外卖餐盒为功能单元,适用于水饺类、煎炸类、筒餐类、粉面类外卖包装。该型号餐盒使用范围最广,最具代表性。

1.2.2 系统边界

如图 1 所示,一次性餐盒生命周期可分为三个阶段,“摇篮到门”、“门到门”、“门到坟墓”。从“摇篮到门”包括原材料的采集,塑料母粒的合成,产品加工合成直至出厂。“摇篮到门”阶段,PP 的生命周期流程始于原油的萃取和裂解,原油经萃取后首先要经过蒸馏,轻油采用常压蒸馏、重油使用减压蒸馏。蒸馏后的产物经过蒸汽裂解得到丙烯,产物丙烯经过纯化后聚合得到最终产物 PP^[9,10]。PLA 的生命周期始于玉米的栽培、收获,收获后的玉米经过干燥、研磨后经过淀粉分离并转化为葡萄糖,并所得葡萄糖转化为乳酸并通过丙交酯生产,聚合成 PLA^[10,11]。原淀粉通过增塑剂和裂解剂的协同作用,在含有一定水分的条件下经高温塑化,得到 TPS,该过程发生颗粒破碎、氢键削弱、淀粉部分降解^[12]。为提升 TPS 机械性能,常将其与别的可降解聚合物共混,于高温挤出形成树脂^[13]。“门到门”阶段一次性餐盒生产包含原料预处理和二次加工成型。母粒在筒体和螺杆的作用下熔融挤出,经辊压作用压延形成片材,片材经过适当模具二次冲压成型得到不同大小和形状的餐盒。“门到坟墓”阶段包括一次性外卖餐盒的使用和废弃两个过程。

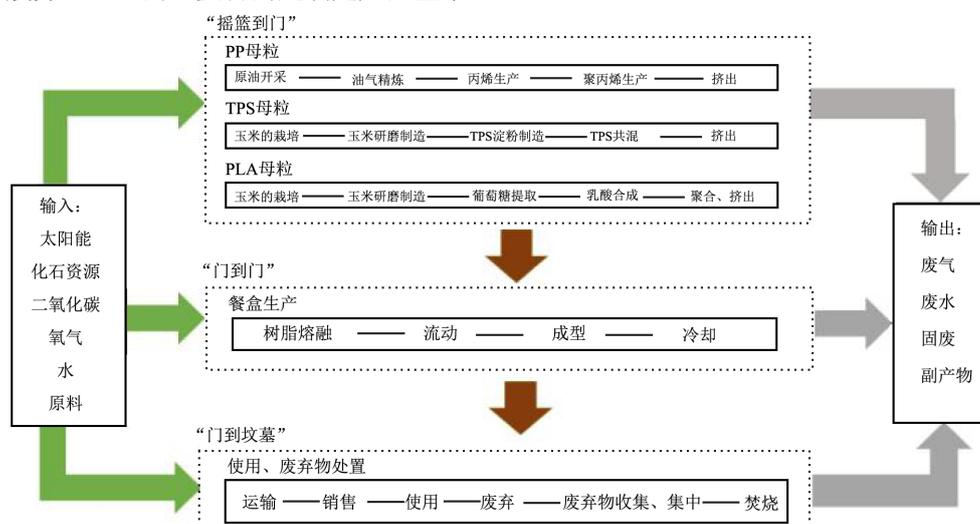


图1 一次性餐盒生命周期的三个阶段

Fig.1 The life cycle of disposable meal box is three stages

1.3 数据来源及处理

1.3.1 原料获取阶段（摇篮到门）

塑料餐盒从摇篮到门的过程包含原材料采集、加工和树脂挤出过程。生命周期清单的数据来源于文献，其中 PP^[14-16]、PLA^[10,17]、TPS^[18]。三种树脂挤出所需设备消耗的电力能耗源于文献^[10,14,19]。

1.3.2 制品生产阶段（门到门）

以上三种树脂的加工和二次成型包括塑料片材的挤出和餐盒热成型排放和能耗数据。本研究采用比热、温差和熔化热值计算，参考公式：

$$\text{Heat Requirement} = L \times W \times T \times \rho \times (cp \times \Delta T + \Delta H_f) \quad [20]$$

式中：

L、W、T——聚合物片长、宽、厚；

ρ ——PLA、PP、TPS 的密度；

cp——聚合物的比热；

ΔT ——聚合物片材与热成型设定温度之间的温差；

ΔH_f ——材料的熔化热。

树脂二次成型的数据来源于文献^[10,14,18,21]。

1.3.3 废弃物处理阶段（门到坟墓）

本文考虑了以下运输方式和距离：对于原材料和包装，使用 Ecoinvent 数据库中的数据^[22]；假设使用 32 t 的卡车运送 150 km；对于废物处理过程所涉及的运输，假设使用一辆 32 t 卡车运送 50 km。垃圾焚烧的温室气体排放估算方法参考 IPCC。一次性餐盒垃圾焚烧的温室气体排放总量包括两个部分，即矿物碳焚烧造成的直接碳排放和企业垃圾装运过程电、热引起的碳排放。

一次性餐盒焚烧温室气体排放和火力发电产能数据通过公式 1 至 3^[23]计算获得。如公式 1 所示，焚烧净排放量 E_f 由两部分构成，一是垃圾焚烧直接造成的排放 E_i ，另一部分则是发电减排量 E_e ，三者单位均为吨。其中， E_i 和 E_e 则分别根据公式 2 和 3 进行估算。垃圾焚烧再生电能计算方法见公式 4。

$$E_f = E_i - E_e \quad (1)$$

$$E_i = MSW_i \times \sum (f_i \times dm_i \times CF_i \times FCF_{i,x} \times Of_w) \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

$$E_e = AD_e \times Ef_e \quad (3)$$

$$AD_e = MSW_i \times HV_{MSW} \times \xi / 3600 \times (1 - \zeta) \quad (4)$$

式中：

E_f ——焚烧净排放量，t；

E_i ——垃圾焚烧直接造成的排放，t；

E_e ——发电减排量，t；

AD_e ——生活垃圾焚烧发电上网电量，MWh；

ξ ——热效率，本文假设为 20%；

ζ ——厂用电率，本文假设为 20%。

1.3.4 生命周期环境影响评价

如表 1 所示，环境属性统计指标包括全球气候变化(GWP)、初级能源消耗(PED)、臭氧层消耗(ODP)、富营养化-淡水(EP)、酸化(AP)、可吸入无机物(RI)在内的六种环境影响类型。生命周期环境影响评价数据源于文献，其中 PP^[12,18]、PLA 和 TPS^[8,15]。

表1 生命周期评价环境影响类型

Table 1 Life cycle assessment of environmental impact types

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 ₂ eq.	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O...
初级能源消耗(PED)	MJ	硬煤、褐煤、天然气...
臭氧层消耗(ODP)	kg CFC-11 eq.	CCl ₄ 、C ₂ H ₃ Cl ₃ 、CH ₃ Br...
酸化(AP)	mol H ⁺ eq.	SO ₂ 、NO _x 、NH ₃ ...
富营养化-淡水(EP)	kg N eq.	NH ₄ -N...
可吸入无机物(RI)	kg PM _{2.5} eq.	CO、PM ₁₀ 、PM _{2.5} ...

2 结果与讨论

表2 三种一次性餐盒生命周期清单一览

Table 2 Life cycle list of three types of disposable lunch box

项目	单位	PP	PLA	TPS	
重量	单个重量	g	23.00	29.00	15.00
	总重量	kg	23.00	29.00	15.00
原料	原油	MJ	23.99	0.00	4.47
	丙烯	kg	24.15	0.00	0.00
	精炼石油气	kg	4.58	0.00	0.00
	木材	MJ	0.00	0.00	0.00
能源	淀粉	MJ	0.00	26.62	0.00
	可再生能源	MJ	92.00	991.00	0.00
排放	不可再生能源	MJ	2412.00	1019.00	489.60
	CO ₂	kg	94.30	83.23	13.19
	CO	kg	0.00	0.00	0.00
	SO ₂	kg	127.65	0.00	23.78
	NO ₂	kg	43.70	0.00	8.14
	PM _{2.5}	kg	0.15	0.06	0.07
	Ethylene	kg	0.07	0.13	0.04

2.1 生命周期清单

如表 2 所示, 根据 PP、PLA、TPS 三种一次性餐盒的生命周期清单数据, 可从资源、能源、污染物排放三个层面进行对比论述, 得出结论如下: 资源使用方面, 作为生物基塑料的 PLA 和 TPS 原料来源可再生, 其应用可显著减少不可再生石化资源消耗, 与使用 PP 相比分别节省 23.99、19.52 MJ 原油, 24.15 kg 丙烯和 4.58 kg 精炼石油气的消耗。能源方面, TPS 较 PP 和 PLA 节省了 1922.40、529.40 MJ 的不可再生能源。污染物排放方面, TPS 较 PP 减少了 103.87 g SO₂、35.56 g NO₂。

2.2 环境影响评价

表3 三种一次性餐盒生命周期环境影响评价

Table 3 Environmental impact assessment for the life cycle of three disposable lunch boxes

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA 结果		
		PP	PLA	TPS
GWP	kg CO ₂ eq	94.51	60.00	49.44
PED	MJ	1917.70	1019.00	1003.82
AP	kg SO ₂ eq	0.37	1.17	0.24
EP	kg PO ₄₃ eq	0.05	0.01	0.08
ODP	kg CFC-11 eq	微量	微量	微量
RI	kg PM _{2.5} eq	0.14	0.14	0.08

如表 3 所示, TPS 餐盒的气体排放值 (GWP), 初级能耗值 (PED)、酸化 (AP) 等主要指标均低于 PP 和 PLA, 在三种材料中环境影响最小。GWP 分别降低 45.07、10.56, PED 分别降低 913.88、15.19, (AP) 较 PP 由 0.24 减少至 0.13。(GWP) 和 (PED) 两项指标可反映材料全球变暖潜力和能源消耗情况。由表中数据可知, 生物质降解材料 PLA、TPS 能耗低, 环境影响小; PP 一次性餐盒能耗高, 过程累积环境影响大, 一次性餐盒领域的使用应制止。TPS 在环境影响上显著优于 PP, 在不考虑回收和堆肥情况环境影响略优于 PLA, 总的来说, 生物质降解材料 PLA、TPS 具有能耗低、对环境影响小的优势, 是一次性餐盒的优良替代材料。PLA 受高成本、废弃物难以满足堆肥条件等因素限制, 可降解优势难以体现。

2.3 碳足迹和能耗累积评价

三种一次性餐盒“摇篮到门”、“门到门”、“门到坟墓”碳足迹和能耗数据如图 3 所示, 可得如下结论: “摇篮到门”阶段, TPS 餐盒的碳排放较 PP 和 PLA 分别降低 47.70%、40.60%; “门到门”阶段, TPS 产生了 11.00

kg 碳排放, 低于 PP 和 PLA; “门到坟墓”阶段, 1000 个 PP、PLA、TPS 餐盒焚烧分别排放 73.67、29.70、38.40 kg CO₂。综合三个阶段, TPS 餐盒的累计碳排放仅为 98.84 kg, 与 PP 和 PLA 餐盒相比, 分别减少 46.90%和 28.30%。PP、PLA、TPS 三个阶段的累积能耗分别为 4949.96、1294.22、679.02 MJ。“摇篮到门”阶段, TPS 能源消耗最少, 仅为 485.60 MJ。“门到门”阶段, TPS 消耗 679.02 MJ 能源, 较 PP 和 PLA 低 2395.85、83.21 MJ。“门到坟墓”阶段, 1000 个 PP、PLA、TPS 一次性餐盒垃圾焚烧发电产能分别为 60.77、7.85、10.44 MJ。三种餐盒能耗主要发生于“摇篮到门”阶段, 占总能耗 50%~80%。

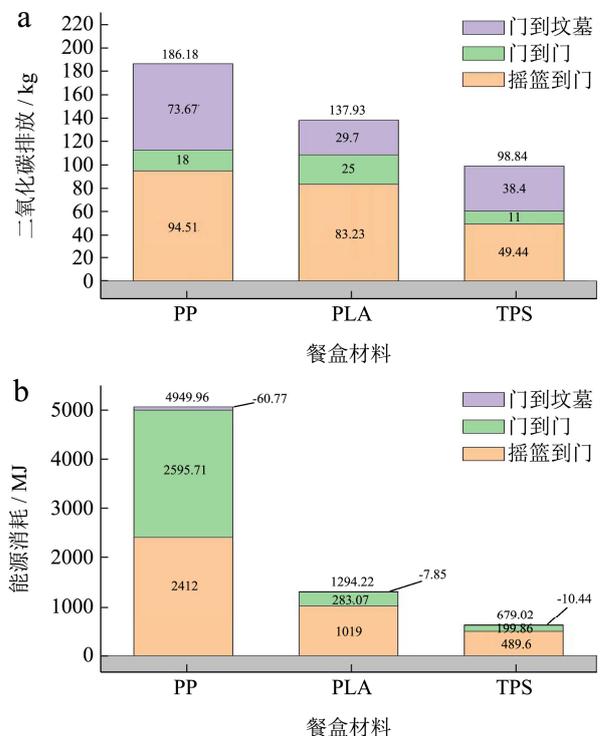


图2 三种一次性餐盒碳排放和能耗比较

Fig.2 Comparison of carbon emission and energy consumption of three disposable lunch boxes

3 结论

本文评价了 PP、PLA、TPS 三类典型一次性外卖餐盒的环境影响, 通过构建一次性塑料餐盒从摇篮到坟墓全生命周期评估模型, 比较原料获取阶段、制品生产阶段、废弃物处理阶段的碳排放当量和能源消耗参数。三类典型塑料餐盒的碳排放当量在原材料获取和废弃物处理阶段最大, 而资源和能源消耗则主要发生在原材料获取和产品生产阶段。其中 PP 餐盒在几乎所有的影响类别中贡献最高, 累计排放 186.18 kg CO₂, 消耗能源 4949.96 MJ; 而 TPS 餐盒累计释放 98.84 kg CO₂, 消耗 679.02 MJ 能源, 与 PP 和 PLA 餐盒相

比碳排放低 46.90%、28.30%，节省能源 4270.94 MJ、615.20 MJ。TPS 作为一种新型的生物基替代材料成本低、环境影响小，故在减少塑料环境污染、助推国家双碳目标潜力巨大，但其机械强度的不足、阻水性差、绿色增塑剂的选用等问题仍有待进一步解决，尤其需要加强可循环、易回可降解产品研发，降低应用成本，有效增加绿色产品供给，例如在满足食品安全性、成本经济性、绿色环保性的同时也需对包装材料本身进行功能化设计，包括阻氧阻湿、耐油耐温、热密封、抗菌、耐冷冻保藏等多样化、个性化的消费需求。

参考文献

- [1] Chen H, Chen L, McClements D J, et al. Starch-based biodegradable packaging materials: a review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 70-82
- [2] Maes T, Jessop R, Wellner N, et al. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile red [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 44501-44501
- [3] 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
PAN Bo, JIA Xue, ZHI Zhaohui, et al. Process optimization and performance analysis of composite modified starch films [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(9): 156-163
- [4] HU Xiuting, JIA Xue, ZHI Zhaohui, et al. Improving the properties of starch-based antimicrobial composite films using ZnO-chitosan nanoparticles [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 210: 204-209
- [5] 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
JIN Zhengyu, WANG Yu, LI Xiaoxiao, et al. Research progress of starch based biodegradable materials [J]. *Journal of China Food Science and Technology*, 2019, 19(5): 1-7
- [6] HU Xiuting, JIA Xue, ZHI Zhaohui, et al. Improving properties of normal maize starch films using dual-modification: combination treatment of debranching and hydroxypropylation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 130: 197-202
- [7] Klöpffer W. Life cycle assessment: from the beginning to the current state [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 1997, 4(4): 223-228
- [8] ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment-Principles and framework [S]. International Organization for Standardization, 2006
- [9] Achillas D S, Roupakias C, Megalokonomos P, et al. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149(3): 536-542
- [10] Madival S, Auras R, Singh S P, et al. Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(13): 1183-1194
- [11] Bulatović V O, Mandić V, Grgić D K, et al. Biodegradable polymer blends based on thermoplastic starch [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2021, 29(2): 492-508
- [12] 申志翔,陈复生,宋小勇,等.淀粉基生物可降解材料的研究进展[J].*食品工业*,2017,38(11):290-294
SHEN Zhixiang, CHEN Fusheng, SONG Xiaoyong, et al. Research progress of starch-based biodegradable materials [J]. *The Food Industry*, 2017, 38(11):290-294
- [13] Liu W, Wang Z, Liu J, et al. Preparation, reinforcement and properties of thermoplastic starch film by film blowing [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108(22): 106006
- [14] Kikuchi Y, Oshita Y, Mayumi K, et al. Greenhouse gas emissions and socioeconomic effects of biomass-derived products based on structural path and life cycle analyses: a case study of polyethylene and polypropylene in Japan [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167(20): 289-305
- [15] Harding K G, Dennis J S, Blotnitz H V, et al. Environmental analysis of plastic production processes: comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly- β -hydroxybutyric acid using life cycle analysis [J]. *Journal of Biotechnology*, 2007, 130(1): 57-66
- [16] 解昊,刘海敏,丘秉焕,等.聚丙烯原料生产的生命周期评价及与聚乳酸的比较[J].*化纤与纺织技术*,2011,40(2):28-32
XIE Hao, LIU Haimin, QIU Binghuan, et al. Life cycle evaluation of polypropylene raw material production and comparison with polylactic acid [J]. *Chemical Fiber & Textile Technology*, 2011, 40(2): 28-32
- [17] Rodríguez L J, Fabbri S, Orrego C E, et al. Comparative life cycle assessment of coffee jar lids made from biocomposites containing poly (lactic acid) and banana fiber [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 266: 110493

(下转第 28 页)