

基于 LCA 的聚乳酸快递包装环境友好性评价

史 玉,徐 凌,陈 郁*,侯昊辰 (大连理工大学环境学院,工业生态与环境工程教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:以聚乳酸快递包装为研究对象,运用生命周期评价(LCA)方法对聚乳酸快递包装的原料获取、加工、使用及 5 种处置情景的环境影响进行比较,并采用累积能源需求(CED)方法对能源消耗情况进行分析.功能单位(1000 个规模为 25×35cm 的聚乳酸快递袋,918kg)快递袋原材料获取、加工及使用阶段的环境影响潜能值分别为 1.09×10^{-9} 、 5.64×10^{-10} 、 1.24×10^{-10} .海洋水生生态毒性是聚乳酸快递袋环境影响的主要类型,占 77%;非生物资源耗竭潜能值、人类毒性次之,分别占 9%和 6%.能源消耗主要类型为不可再生能源,占总能源消耗的 89%,其中,快递袋使用阶段为主要贡献阶段,占比为 91%.处理阶段 5 种处置情景中情景 V(焚烧 47%,填埋 13%,回收 40%)对环境最为友好,通过增加焚烧和回收处置的比例,减少填埋比例对环境有着更为积极的影响.

关键词:聚乳酸;快递包装;生命周期评价;环境影响;累积能源需求

中图分类号: X820.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2020)12-5475-09

Assessment of the environment-friendliness of PLA express packaging using LCA methodology. SHI Yu, XU Ling, CHEN Yu*, Hou Hao-chen (Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, Ministry of Education, School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China). *China Environmental Science*, 2020,40(12): 5475~5483

Abstract: In this paper, the life cycle assessment (LCA) was used to compare the environmental impact of raw materials extraction, production, use and five disposal scenarios of polylactic acid (PLA) express packaging, and the cumulative energy demand (CED) method was used to analyze energy consumption. The environmental impact potential of the raw materials extraction, production, and use of express bags were 1.09×10^{-9} , 5.64×10^{-10} and 1.24×10^{-10} , respectively for per functional unit—consisting of 1000PLA express bags with the size of 25×35cm and the weight of 918 kg. Marine aquatic ecotoxicity was the main environmental impact in the life cycle of PLA, accounting for 77%, followed by abiotic depletion and human toxicity, accounting for 9% and 6% respectively. The main energy consumption was non-renewable energy, which accounted for 89% of the total energy consumption. Across all the stages considered, the use stage showed the dominant influence on non-renewable energy consumption with the contribution of 91%. Disposal scenario V (incineration 47%, landfill 13%, recycling 40%) was the most environmentally friendly among the five disposal scenarios, indicating that the increase in the proportion of incineration and recycling and decrease in the proportion of landfill showed a more positive impact on the environment.

Key words: polylactic acid; express packaging; life cycle assessment; environmental impact; cumulative energy demand

快递业是现代服务的重要产业,对国家经济的发展有着至关重要的作用.据统计,2019 年全国的快递业务量达到了 600 亿件以上,预测 2020 年中国快递的业务量会增长 23%^[1].快递行业在方便人们生活的同时,也对环境产生较大负面影响.快递行业需要大量的包装材料,而这些包装材料的生产、运输、处置又需要消耗大量的资源和能源,同时产生环境排放.因此,快递包装迫切需要通过实现减量化、资源化、可循环化来缓解日益增长的环境压力.

2019 年 5 月发布的《绿色包装评价方法和准则》(GB/T 37422-2019),要求绿色包装产品具备低碳、节能、环保、安全等要求,鼓励物流企业和用户使用可降解程度高、能够循环利用的环保材料.在此背景下,

相关研究^[2-4]从快递包装原材料入手,对聚乳酸在快递包装应用中的可行性开展了大量研究,得出聚乳酸是制作快递袋的首选可降解材料.但研究仅从理论层面对聚乳酸快递袋的可行性进行了探讨,并未采用科学方法对具体的环境影响进行系统评价.综合来看,聚乳酸作为一种新型可再生生物降解材料具有众多优势,但是环保材料生产成本低,技术复杂,相应的环境成本也会增加.为了进一步明确环境影响,还需要对聚乳酸快递袋全生命周期过程进行分析,为管理者提供决策支持.

收稿日期: 2020-04-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费(DUT20LAB304)

* 责任作者,副教授,chenyu@dlut.edu.cn

目前,生命周期理论已经在国内外得到了广泛的应用,关于快递方面的生命周期评价也有了较为系统的研究.国内的研究主要集中在两个方面:一是快递包装中不可降解材料的使用对环境及人类造成的重大影响^[5];二是聚乙烯快递袋、纸箱、编织袋等快递包装环境影响的对比^[6-7].相比于国内,国外研究并没提及到快递包装,而是对比了以聚乳酸、聚对苯二甲酸等材料为原料的食物包装的环境影响^[8-9].相关研究^[10-11]还对比了聚乳酸材料不同处置方式的环境影响.总而言之,国内外关于聚乳酸的研究主要集中在食品包装及其最终处置方面,关于快递包装的研究则主要集中在纸箱、聚乙烯快递袋的生命周期评价方面,而对环保材料聚乳酸应用于快递包装方面生命周期评价的研究却少有报道.

当前,常用的生命周期评价方法体系有 CML 2001、EDIP 97、Ecoindicator 99 等,其中 CML 2001 采用中间点分析减少了假设的数量和模型的复杂性,可以全面地评估产品对环境的影响,其考虑了 11 个影响类别,非生物资源耗竭潜能和生物资源耗竭潜能两个影响类别被用来评价产品能源消耗情况,但是这两个评价指标并不能体现出可再生能源和不可再生能源的消耗情况.因此,本文引入累积能源需求方法,将其和 CML 2001 方法结合对聚乳酸快递袋的环境友好性进行评价,能够进一步识别整个生命周期过程中可再生能源和不可再生能源的使用情况.此前,相关研究^[10-12]已经对累积能源需求方法在生命周期中的应用进行了深入的探究.

本文通过对聚乳酸快递袋进行全生命周期评价,比较分析生命周期各个阶段中的主要环境影响类型和能源消耗情况,确定聚乳酸快递袋全生命周期中对环境产生负面影响的主要生产环节及影响类别,以期为我国聚乳酸快递袋的生命周期评价的相关研究提供数据.

1 聚乳酸快递袋生命周期评价

依据国际环境毒理和化学学会 (SETAC) SO14040-2006 环境管理体系“生命周期评价-原则与框架”,生命周期评价包含 4 个步骤:目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释^[13].

1.1 目标和范围的确定

1.1.1 研究目标及目的 以新型环保材料聚乳酸为原料生产的快递袋为研究对象,采用德国 PE 公司研发的生命周期评价软件 GaBi6.0 对聚乳酸快递袋全生命周期产生的环境影响进行了计算和分析.根据评价结果确定聚乳酸快递袋生命周期的主要影响因素,分析造成环境影响的主要阶段和污染物质,提出聚乳酸快递袋生产工艺的改进建议.

1.1.2 研究范围定义 本研究的功能单位^[14]界定为 1000 个规模为 25cm×35cm 的聚乳酸快递袋,单个聚乳酸快递袋的重量为 0.918kg,则研究对象的总重量为 918kg.生命周期评价范围包括:原材料(聚乳酸、粘胶和电子运单)获取阶段、快递袋加工阶段、使用阶段、处置阶段.系统边界如图 1 所示.

考虑到系统的复杂性,对系统边界作出以下说明和假设:

(1)京东是中国最大的自营式电商企业,因此,本文选取位于北京城区的京东作为物流运输公司的代表.

(2)在进行货物包装和拆解快递的过程中几乎不对环境产生影响,因此使用阶段只考虑运输.

(3)由于原材料来源地较多,无法获取其具体的数据,因此本研究范围不考虑原材料生产到加工厂的运输.同时,因无法获取商家快递袋购入渠道,所以研究范围也不包括快递袋到商家的运输.

(4)根据 2012~2019 年中国邮政局公布的《邮政行业发展统计公报》中统计的快递业务量,选取前 6 名的城市作为研究对象.6 个城市分别为北京、上海、杭州、深圳、广州、金华.从京东到大连理工大学菜鸟驿站的运输分为两段:第一段,6 个城市京东仓库到大连甘井子配送站的平均距离,为 2119.683km,卡车运输,燃料为柴油;第二段,大连甘井子配送站到大连理工大学菜鸟驿站,距离为 15.6km,油电混合动力车运输.

(5)焚烧和填埋是包装废料主要的处置方式,而在当前重视环保、资源再生的情况下,回收处理、再生利用已成为社会各界关注的重点^[15-17].因此,本研究考虑了焚烧、填埋、回收 3 种处置方式.焚烧阶段考虑了电回用.

(6)考虑火力发电为主要发电方式.

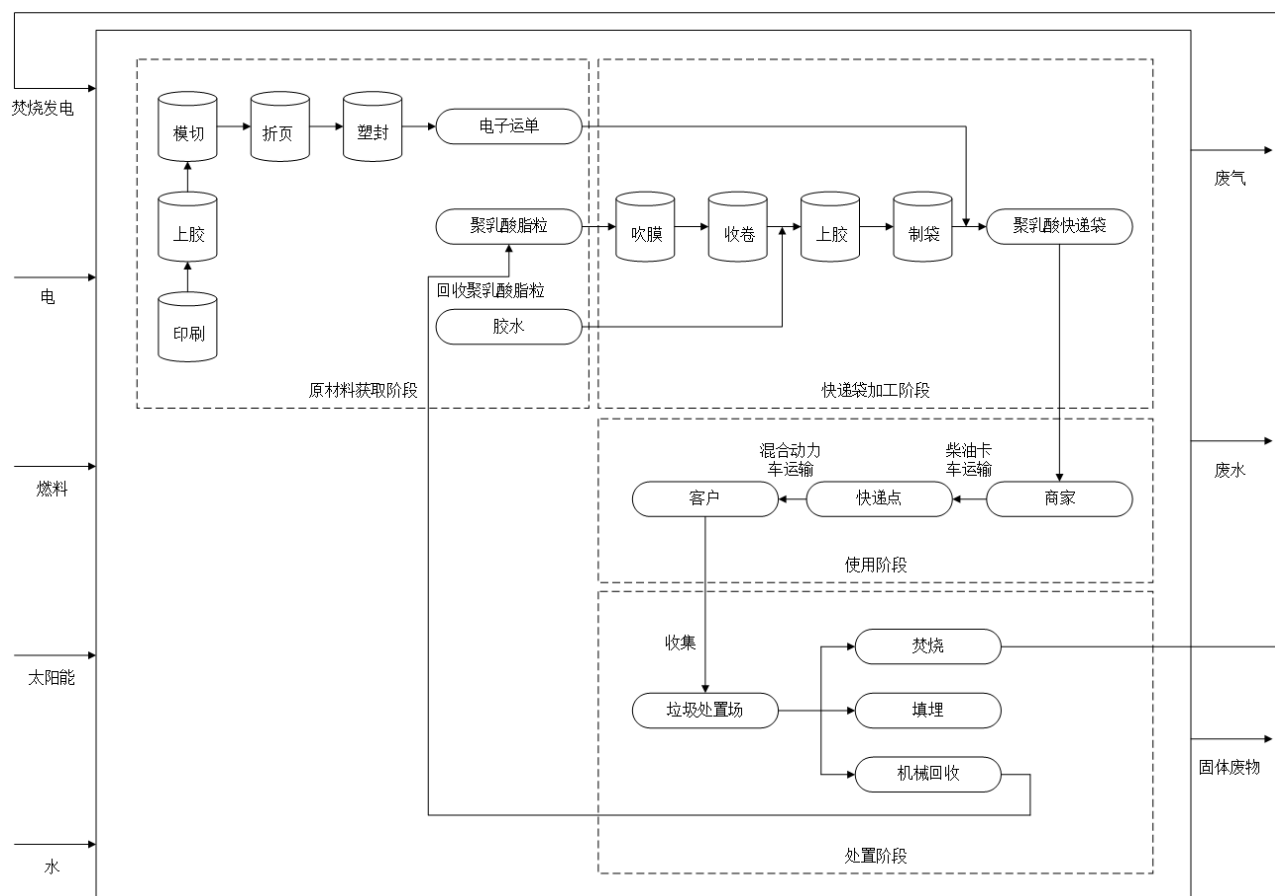


图1 系统边界

Fig.1 System boundary

1.2 清单分析

以系统边界为依据,收集了聚乳酸、电子运单、粘胶、快递袋加工、使用以及处置阶段的数据,并建立了生命周期清单.输入原料包括水、原煤、原油等;能源消耗主要涉及电能.排放物主要是废水、废气以及固体废物,其中,废水包括生产废水和生活废水,废气包括排放到大气中的粉尘、 CO_2 、 CO 、 VOC_s 、 SO_x 、 NO_x 等,固体废物包括各个阶段产生的边角料、生活垃圾、危险废物等.设备在运行期间的噪声污染在本文中忽略不计.聚乳酸快递袋生命周期清单见表1.

1.2.1 原材料获取阶段 原材料获取阶段中以生产1000个快递袋所需原料折算本阶段的资源、能源消耗和环境排放.聚乳酸选取自美国 Nature Works 生产的 Ingeo^[18],它采用玉米作为原料,通过淀粉生产、葡萄糖生产、乳酸生产、丙交酯生产等工序制成聚乳酸,其资源能源消耗和排放数据均来自于 GaBi6.0 软件.封袋胶水的数据也来自于 GaBi6.0 软件,其生产过程包括制浆搅拌、加热熔

融、冷却等工序.封胶生产阶段的废气主要来源于加热熔融阶段.电子运单的数据来自于现场调研,其生产过程包括复合、印刷、过油、过胶、模切等工序.电子运单生产阶段的废气主要来源于印刷、过油、过胶、复合阶段.废水主要包括生活废水,考虑了纳入总量控制要求的污染物 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$.固废包括一般废物和危险废物,其中折纸、压痕工段中产生的废边角料等一般工业固废,交由有资质的一般工业固体废物经营活动单位处理,而废包装桶等危险废物由有资质的危废处置单位进行处理.

1.2.2 快递袋加工阶段 快递袋加工阶段的原料、能源消耗和排放数据主要来源于现场调研.快递袋加工工序包括加热吹膜、收卷、上胶、制袋等过程.由于无法确定印刷面积,所以本研究不考虑印刷工段的资源能源消耗以及环境排放.快递袋加工阶段的废气主要来源于吹膜、制袋、封边工段,以非甲烷总烃计.废水主要包括生活废水、冷却循环废水(包含了 COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、SS 等).固废包括一般

废物和危险废物,其中吹膜、制袋工段中产生的废边角料,交由有资质的一般工业固体废物经营活动单位处理,废活性炭等危险废物交由有资质的危废处置单位进行处理.

表 1 聚乳酸快递袋数据清单
Table 1 Inventory of PLA express bag

过程	输入					输出				
	类别	物质	单位	数量	数据来源	类别	物质	单位	数量	数据来源
原料获取阶段	物料	纸品	kg	2.27×10 ¹	现场调研	废水	COD	kg	8.26×10 ⁻²	现场调研
		油墨	kg	1.99×10 ⁻³	现场调研		氨氮	kg	5.78×10 ⁻³	现场调研
		热熔胶	kg	7.95×10 ⁻²	现场调研	废气	VOC _s	kg	6.28×10 ⁻⁴	现场调研
		水性光油	kg	5.96×10 ⁻³	现场调研		废活性炭	kg	4.77×10 ⁻³	现场调研
	能源	水	kg	3.58×10 ⁻¹	现场调研	固废	边角料和次品	kg	3.98×10 ⁻²	现场调研
		电	kW·h	6.00×10 ⁻²	现场调研		生活垃圾	kg	8.94×10 ⁻²	现场调研
							废抹布	kg	5.96×10 ⁻⁴	现场调研
							废包装桶	kg	1.99×10 ⁻³	现场调研
快递袋加工阶段	物料	聚乳酸	kg	9.18×10 ²	现场调研	废水	BOD ₅	kg	6.49×10 ⁻²	现场调研
		电子运单	kg	1.99×10 ¹	现场调研		COD	kg	1.43×10 ⁻¹	现场调研
		热熔胶	kg	2.62×10 ⁻¹	现场调研		氨氮	kg	1.08×10 ⁻²	现场调研
	能源	水	kg	7.18×10 ²	现场调研	废气	SS	kg	1.02×10 ⁻¹	现场调研
		电	kW·h	5.39×10 ²	现场调研		非甲烷总烃	kg	2.57×10 ¹	现场调研
						固废	废活性炭	kg	2.10×10 ¹	现场调研
							边角料和次品	kg	4.55×10 ¹	现场调研
							生活垃圾	kg	4.49×10 ¹	现场调研
使用阶段	第一段运输	能源	柴油	kg	4.44×10 ⁴	废气	CH ₄	kg	2.51×10 ¹	数据库
							CO	kg	2.47×10 ²	数据库
							CO ₂	kg	1.55×10 ⁵	数据库
							VOC _s	kg	5.12×10 ¹	数据库
							NO _x	kg	1.04×10 ³	数据库
							N ₂ O	kg	3.88×10 ¹	数据库
							SO ₂	kg	3.42×10 ¹	数据库
	第二段运输						粉尘	kg	1.79×10 ¹	数据库
		能源	天然气	kg	3.22×10 ⁻¹	废气	CH ₄	kg	9.74×10 ¹	文献
			煤	kg	4.58×10 ¹		CO	kg	2.12×10 ⁻¹	文献
			原油	kg	5.73×10 ²		CO ₂	kg	2.13×10 ²	文献
							VOC _s	kg	9.57×10 ⁻⁴	文献
							NO _x	kg	3.48×10 ⁻⁴	文献
							N ₂ O	kg	4.42×10 ⁻⁶	文献
							SO _x	kg	1.60×10 ⁻³	文献
							粉尘	kg	4.68×10 ⁻⁶	文献
处置阶段	物料	石灰	kg	1.56×10 ¹	文献	固体废物能源	废热	kg	2.63×10 ⁵	文献
		硫酸铝	kg	1.88×10 ¹	文献					
		扩链剂	kg	5.54×10 ¹	文献					
	能源	水	kg	1.55×10 ²	文献					
		电	kW·h	6.75×10 ²	文献					

注：原材料包括电子运单、聚乳酸、粘胶.电子运单的数据来源于现场调研;聚乳酸和封袋胶水的数据均来自于GaBi6.0软件中的数据库,不再列入表中;处置方式包括填埋、焚烧和机械回收.机械回收的数据来源于文献调查;焚烧和填埋的数据均来自于GaBi6.0软件中的数据库,不再列入表中.

1.2.3 使用阶段 使用阶段只考虑运输.第一段运输数据来自 GaBi6.0 数据库.第二段运输数据来源于文献.在运输过程中主要产生了废气,包括 CH₄、NH₃、CO₂、NO_x、SO_x等.

1.2.4 处置阶段 处置阶段考虑了焚烧、填埋、回收 3 种处置方式,数据均来源于 GaBi6.0 软件内置数

据库.本文结合当前我国垃圾处置方式现状,假设了以下处置情景:

情景 I : 填埋 100%;情景 II : 焚烧 40%,填埋 60%(2017 年中国生活垃圾处理方式^[19]);情景 III : 焚烧 47%,填埋 53%(2018 年中国生活垃圾处理方式^[19]);情景 IV : 焚烧 47%,填埋 23%,回收 30%;情景 V :

焚烧 47%,填埋 13%,回收 40%

2 影响评价

选取生命周期评价方法和累积能源需求方法对聚乳酸快递袋的环境友好性进行了分析.CML2001 是生命周期评价方法体系的一种,它是由荷兰 Leiden 大学环境科学中心开发的一种面向问题的影响评估方法,可以全面地评估产品对环境的影响^[20].CML2001 包含以下指标:生物资源耗竭潜能值(ADP_e)、非生物资源耗竭潜能值(ADP_f)、酸化潜能值(AP)、水体富营养化潜能值(EP)、淡水水生态毒性(FAETP)、全球变暖潜能值(GWP)、人类毒性(HTP)、海洋水生态毒性(MAETP)、臭氧耗竭潜能值(ODP)、光化学烟雾生成潜能值(POCP)、陆地生态毒性(TETP).

表 2 原材料获取、快递袋加工制造、使用阶段环境影响潜能值

Table2 Environmental impact potential of raw materials extraction, production, use stage				
影响类别	原材料获取阶段	快递袋加工阶段	使用阶段	总计
ADP _e	2.49×10 ⁻¹²	1.38×10 ⁻¹³	4.49×10 ⁻¹⁴	2.67×10 ⁻¹²
ADP _f	7.56×10 ⁻¹¹	1.22×10 ⁻¹¹	7.24×10 ⁻¹¹	1.60×10 ⁻¹⁰
AP	2.90×10 ⁻¹¹	8.16×10 ⁻¹²	1.10×10 ⁻¹¹	4.81×10 ⁻¹¹
EP	8.23×10 ⁻¹²	9.19×10 ⁻¹³	1.22×10 ⁻¹²	1.04×10 ⁻¹¹
FAETP	1.27×10 ⁻¹²	1.97×10 ⁻¹²	3.86×10 ⁻¹³	3.62×10 ⁻¹²
GWP	1.28×10 ⁻¹¹	1.10×10 ⁻¹¹	1.55×10 ⁻¹¹	3.93×10 ⁻¹¹
HTP	3.78×10 ⁻¹¹	6.32×10 ⁻¹¹	3.09×10 ⁻¹²	1.04×10 ⁻¹⁰
MAETP	9.11×10 ⁻¹⁰	4.48×10 ⁻¹⁰	1.11×10 ⁻¹¹	1.37×10 ⁻⁰⁹
ODP	4.60×10 ⁻¹⁵	4.33×10 ⁻¹⁹	1.44×10 ⁻²⁰	4.60×10 ⁻¹⁵
POCP	1.39×10 ⁻¹¹	1.55×10 ⁻¹¹	9.31×10 ⁻¹²	3.87×10 ⁻¹¹
TETP	1.43×10 ⁻¹²	3.54×10 ⁻¹²	2.80×10 ⁻¹³	5.26×10 ⁻¹²
总计	1.09×10 ⁻⁰⁹	5.64×10 ⁻¹⁰	1.24×10 ⁻¹⁰	1.78×10 ⁻⁰⁹

注:各影响类别当量单位:ADP_e[kg 铈当量]、ADP_f[MJ]、AP[kg 二氧化硫当量]、EP[kg 磷酸当量]、FAETP[kg 3,3-二氯联苯胺盐酸盐当量]、GWP[kg 二氧化碳当量]、HTP[kg 3,3-二氯联苯胺盐酸盐当量]、MAETP[kg 3,3-二氯联苯胺盐酸盐当量]、ODP[kg 三氯一氟甲烷当量]、POCP[kg 乙烯当量]、TETP[kg 3,3-二氯联苯胺盐酸盐当量];总计表示总的环境影响,是各环境影响归一化后的加和.

累积能源需求,是用来表征产品系统能耗水平的指标,主要指与生产、使用和处置一项经济产品(产品或服务)有关的全部能源需求,即被视为一次能源的需求.计算公式如下:

$$CED=\sum_{process} CED_{p,process}$$

(1)

$$CED_{p,process}=\sum_{production} ced_{production} \cdot m_{production}$$

(2)

式中:CED 为总累积能量需求,MJ;CED_{p,process} 为每个阶段的能量需求,MJ;ced_{production} 为单位产品的能量需求,MJ/kg;m_{production} 为产品使用量,kg.

运用 GaBi6.0 软件内部的计算功能进行特征化和归一化.其中,归一化基准值一般选用全球或国家地区范围内的资源消耗量或总排放量.本文所使用的 CML2001 的评价模型包含了全球、欧洲和荷兰范围基准值,这里选用全球环境影响作为基准值.同时,结合累积能量需求方法,可以得到聚乳酸快递袋全生命周期环境影响潜能值及能源消耗情况,如表 2~4 所示.

表 3 5 种处置情景环境影响潜能值
Table 3 Environmental impact potential of five disposal scenarios

影响类别	情景 I	情景 II	情景 III	情景 IV	情景 V
ADP _e	3.87×10 ⁻¹⁴	-1.13×10 ⁻¹²	-1.33×10 ⁻¹²	-2.01×10 ⁻¹²	-2.24×10 ⁻¹²
ADP _f	2.46×10 ⁻¹²	-6.48×10 ⁻¹²	-8.04×10 ⁻¹²	-2.59×10 ⁻¹¹	-3.19×10 ⁻¹¹
AP	7.37×10 ⁻¹³	-4.55×10 ⁻¹²	-5.47×10 ⁻¹²	-1.10×10 ⁻¹¹	-1.28×10 ⁻¹¹
EP	1.14×10 ⁻¹²	2.60×10 ⁻¹³	1.06×10 ⁻¹³	-2.26×10 ⁻¹²	-3.05×10 ⁻¹²
FAETP	1.26×10 ⁻¹³	-1.24×10 ⁻¹²	-1.48×10 ⁻¹²	-1.16×10 ⁻¹²	-1.06×10 ⁻¹²
GWP	1.55×10 ⁻¹²	1.32×10 ⁻¹¹	1.52×10 ⁻¹¹	1.53×10 ⁻¹¹	1.53×10 ⁻¹¹
HTP	1.40×10 ⁻¹²	-4.57×10 ⁻¹¹	-5.40×10 ⁻¹¹	-4.15×10 ⁻¹¹	-3.73×10 ⁻¹¹
MAETP	3.29×10 ⁻¹¹	-2.06×10 ⁻¹⁰	-2.48×10 ⁻¹⁰	-3.51×10 ⁻¹⁰	-3.85×10 ⁻¹⁰
ODP	7.67×10 ⁻²⁰	5.36×10 ⁻¹⁵	5.12×10 ⁻¹⁰	3.80×10 ⁻¹⁵	3.36×10 ⁻¹⁵
POCP	5.23×10 ⁻¹³	-2.90×10 ⁻¹²	-3.50×10 ⁻¹²	-5.77×10 ⁻¹²	-6.53×10 ⁻¹²
TETP	1.17×10 ⁻¹²	-1.6×10 ⁻¹²	-2.18×10 ⁻¹²	-1.61×10 ⁻¹²	-1.42×10 ⁻¹²
总计	4.20×10 ⁻¹¹	-2.56×10 ⁻¹⁰	-3.08×10 ⁻¹⁰	-4.27×10 ⁻¹⁰	-4.66×10 ⁻¹⁰

注:各影响类别当量单位:ADP_e[kg 铈当量]、ADP_f[MJ]、AP[kg 二氧化硫当量]、EP[kg 磷酸当量]、FAETP[kg 3,3-二氯联苯胺盐酸盐当量]、GWP[kg 二氧化碳当量]、HTP[kg 3,3-二氯联苯胺盐酸盐当量]、MAETP[kg 3,3-二氯联苯胺盐酸盐当量]、ODP[kg 三氯一氟甲烷当量]、POCP[kg 乙烯当量]、TETP[kg 3,3-二氯联苯胺盐酸盐当量];总计表示总的环境影响,是各环境影响归一化后的加和.

表 4 聚乳酸快递袋各阶段能源消耗(MJ)
Table 4 Energy consumption of PLA express bag in each stage (MJ)

阶段	可再生累积能源需求	不可再生累积能源需求	总计
原材料获取阶段	2.50×10 ⁴	3.16×10 ⁴	5.67×10 ⁴
快递袋加工阶段	7.76×10 ²	4.83×10 ³	5.60×10 ³
使用阶段	2.13×10 ⁴	3.43×10 ⁵	3.64×10 ⁵
总计	4.71×10 ⁴	3.80×10 ⁵	4.27×10 ⁵

3 结果与分析

3.1 生命周期不同阶段环境影响潜能值

根据加权的结果得出聚乳酸快递袋全生命周期的环境影响,结果如图2所示.其中聚乳酸快递袋生命周期环境影响大小依次为 MAETP、ADP_f、HTP、AP、POCP、GWP、EP、TETP、FAETP、ADP_e、ODP. MAETP 是聚乳酸快递袋环境影响的主要类型,为 1.37×10^{-9} ; ADP_f、HTP 次之,分别为 1.60×10^{-10} 、 1.04×10^{-10} ; AP、GWP、POCP 再次之,分别为 4.81×10^{-11} 、 3.93×10^{-11} 、 3.87×10^{-11} ,其余环境类别影响值较小(EP、FAETP、ADP_e、ODP、TETP,总占比1%,归为一类). MAETP 主要来源于原材料获取阶段、快递袋加工阶段和使用阶段中石油等化石能源的使用^[21]. ADP_f 主要是由于使用阶段中运输消耗了大量的柴油、汽油等燃料. HTP 主要是因为电子运单生产、胶水生产和快递袋加工阶段产生了大量的废活性炭、废包装桶等危险废物以及机械加工时产生的粉尘、VOCs^[22]等对人体有害的物质. AP 主要是由于汽车运输排放了大量 SO₂、NO_x. GWP 主要是因为运输时排放了大量 CO₂、CO、CH₄、N₂O 等气体. POCP 主要是因为电子运单、快递袋加工过程中释放了一定的非甲烷总烃. 非甲烷总烃除直接对人体健康有害外,在一定条件下经日光照射还能产生光化学烟雾,对环境 and 人类健康造成危害.

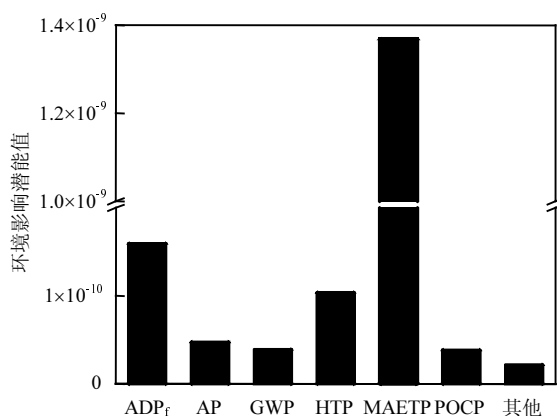


图2 聚乳酸快递袋环境影响潜能值

Fig.2 Environmental impact potential of PLA express bag

对聚乳酸快递袋的原材料获取阶段、加工阶段以及使用阶段,建立环境影响柱状图和雷达图,如图3所示.其中,环境影响大小的顺序依次为原材料获

取阶段、快递袋加工阶段、使用阶段,其环境影响潜能值分别为 1.09×10^{-9} 、 5.64×10^{-10} 、 1.24×10^{-10} .由图3(b)可知,MAETP、ADP_f、HTP 为原材料获取阶段的较高值.原材料聚乳酸属于生物基,其原料为玉米,和石油基塑料相比在温室效应方面具有较好的表

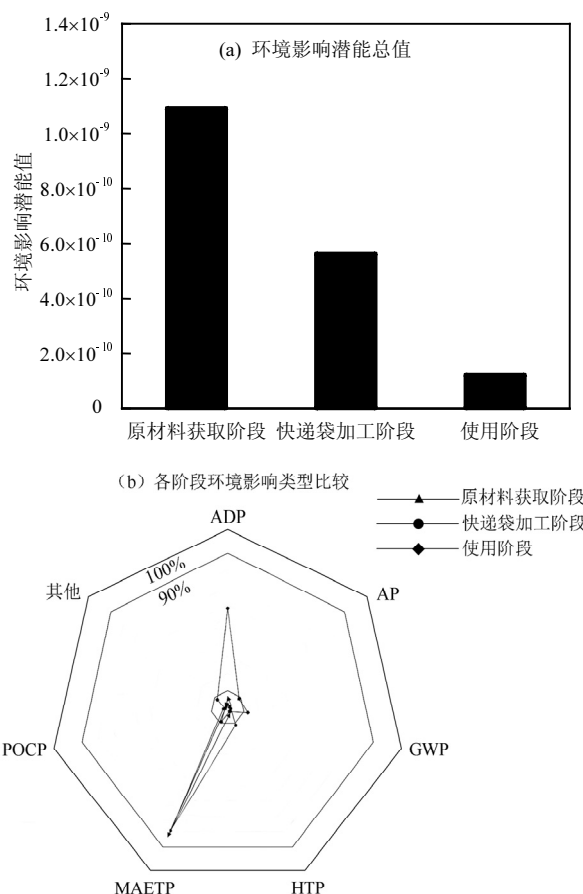


图3 各阶段环境影响潜能总值和类型比较

Fig.3 Comparison of total environment impact potential and type in each stage

现^[23].但是聚乳酸的生产成本较高,需要采取电渗析法进行乳酸提纯^[24],这需要消耗大量的电,从而造成了 MAETP 增加.除了聚乳酸作为原材料,电子运单和胶水也是原材料,电子运单生产过程中的过胶、复合等工艺会产生一定量的 VOCs,进而对人体健康造成影响.此外,这三种原材料生产过程中产生的废活性炭、废包装桶等危险废物也会影响人体健康.快递袋加工阶段具有最高的 HTP 和 POCP,这是由于快递袋产品加工涉及吹膜、收卷、上胶、制袋等工艺.在吹膜工段需要加热呈熔融状态,在这个过程中会有非甲烷总烃产生,在制袋的时候需要喷热熔胶,热熔胶受热挥发产生非甲烷总烃,此外,快递袋封边要

在一定温度下进行,也会有非甲烷总烃产生.当环境中的非甲烷总烃浓度过高时,会造成光化学烟雾,对环境和人类健康造成危害.使用阶段产生了最高的 GWP,这是由于运输过程中汽车尾气含有大量的温室气体,例如 CO_2 、 CH_4 等,造成 GWP 升高.

3.2 处置阶段

由图 4 可知,处置情景 II~V 的环境影响潜能值都为负值,对环境的影响是正向的,这主要是因为焚烧用于发电,产生的电反过来用于快递袋生产用电,实现了电回用.同时,回收处置也较好的实现了对快递包装的再生利用.

从图 4 中还可以看出,情景 V 的环境友好性最好,为 -4.66×10^{-10} ,其次是情景 IV,为 -4.27×10^{-10} ,再次是情景 III,为 -3.08×10^{-10} ,之后是情景 II,为 -2.56×10^{-10} ,而情景 I 对环境的影响是负面的,为 4.20×10^{-11} .比较情景 I~III 可以得出,将焚烧的比例由零增加到 47%,对环境的影响逐渐较小,最后呈现环境友好性.比较情景 IV 和情景 V,保持焚烧比例不变,减少填埋处理比例,增加回收处置的比例对环境有着积极的影响.

从图 5(a)中可以看出, ADP_e 、 MAETP 、 GWP 、 HTP 、 TETP 是情景 I 的主要环境影响类别.聚乳酸虽然是生物基材料,但是自然环境下降解所需的时间较长,要提高废弃聚乳酸的降解速率,需要采取一定的技术措施,例如有针对性的培养细菌、真菌等^[26],但是这也会造成大量的细菌和病毒残留在土壤中,对环境和人体健康造成影响.同时电子运单和粘胶属于难降解的物质,长期留在土壤中会产生大量的有毒物质,在迁移转化的作用下对土壤环境和水环境造成严重影响,使 MAETP 和 TETP 呈现出较高值.此外,在进行填埋处置时,释放出了大量的填埋气,其主要组成是温室气体 CH_4 和 CO_2 ,它们会产生温室效应,加剧全球气候变暖.此外,填埋气中还含有致癌、致畸的有机挥发性气体,对人体健康造成严重影响^[26].从图 5(b)中可以看出,情景 II 和情景 III 相比, GWP 有着明显的提升,这主要是因为焚烧塑料时产生了大量的温室气体,例如 CO_2 .比较情景 IV 和情景 V, HTP 、 TETP 、 FAETP 对环境的友好性明显的降低,这主要是因为机械回收需要添加化学物质改变塑料特性便于回收^[27],这些化学物质在迁移转化的作用下,使周围环境的毒性呈现出较高值.

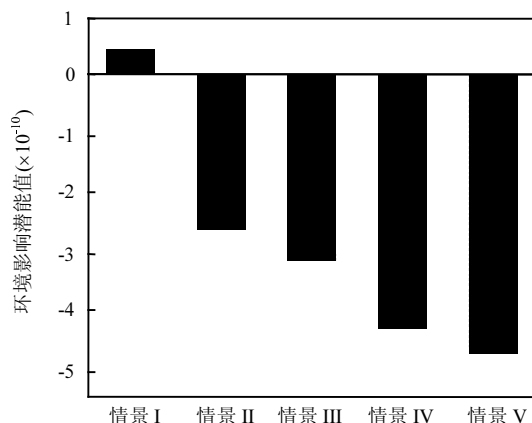


图 4 5 种处置情景环境影响潜能总值比较

Fig.4 Comparison of environmental impact potential of five disposal scenarios

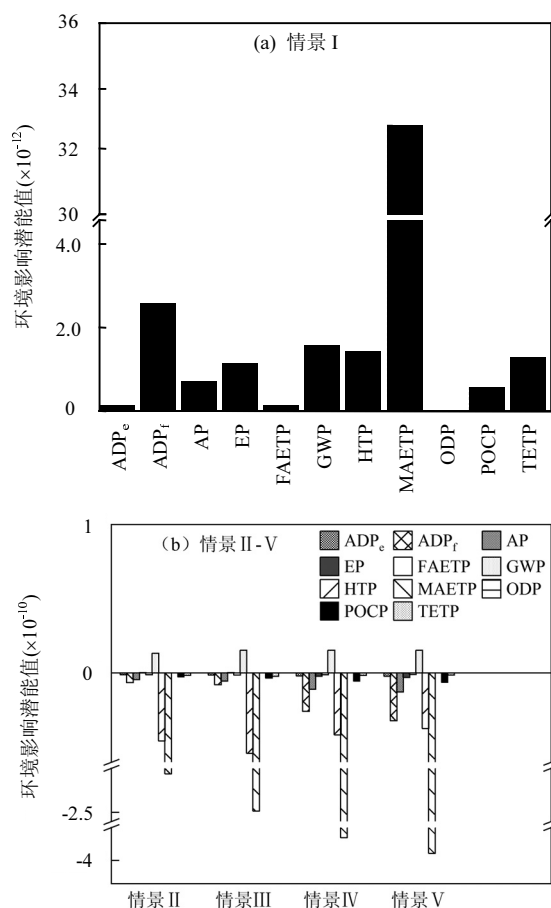


图 5 不同情景环境影响类型比较

Fig.5 Comparison of environmental impact types in each scenario

3.3 生命周期不同阶段累积能量需求

如图 6(a)所示,原材料获取阶段、快递袋加工阶段、使用阶段的能源消耗占比分别为 13%、1%、86%.可以看出,快递袋使用阶段消耗的能源最多,这主要是因为使用阶段涉及到运输,而化石能源—柴油是

运输工具的主要动力.由图 6(b)所示,可再生能源和不可再生能源消耗占比分别为 11%和 89%,可以看出,不可再生能源消耗占比较大,而使用阶段为主要贡献阶段,占比为 91%,这也是由于运输过程中使用大量的化石能源造成的.对于可再生能源消耗来说,原材料获取阶段、快递袋加工阶段、使用阶段占比分别为 53%、2%、45%,原材料获取阶段在可再生能源使用方面具有较好的表现.

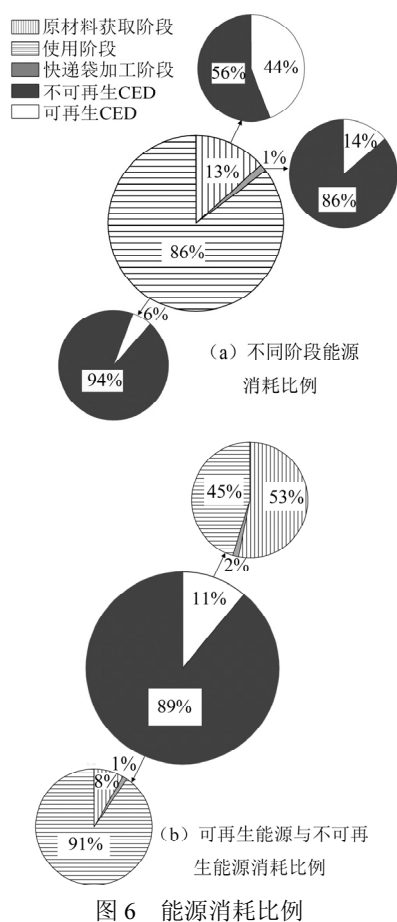


图 6 能源消耗比例
Fig.6 Proportion of energy consumption

4 结论

4.1 通过建立系统边界,对聚乳酸快递袋生命周期建立物质投入及排放清单,清单分析结果表明:生产 1000 个聚乳酸快递袋,MAETP、ADP_f、HTP、AP、GWP、POCP 分别为 1.37×10^{-9} 、 1.60×10^{-10} 、 1.04×10^{-10} 、 4.81×10^{-11} 、 3.93×10^{-11} 、 3.87×10^{-11} 。

4.2 生产 1000 个聚乳酸快递袋,原材料获取阶段、快递袋加工阶段、使用阶段的环境影响潜能值分别为 1.09×10^{-9} 、 5.64×10^{-10} 、 1.24×10^{-10} 。其中,原材料获取阶段的环境影响潜能值最大,而 MAETP 为主要贡

献类别。

4.3 可以通过选取无毒低毒的替代性原材料、积极开展自动化和密闭化过程控制、大力推广节能和新能源运输车、利用好垃圾焚烧发电技术等措施进一步提高快递包装的环境友好性。

4.4 5 种处置情景对环境的友好性由大到小依次为情景 V、情景 IV、情景 III、情景 II、情景 I。增加焚烧和回收的比例对环境更为友好,垃圾分类也有必要在全国范围内广泛推广,不仅可以促进快递包装的回收利用,也有利于提高焚烧发电厂包装废物焚烧的热效率。

参考文献:

- [1] 人民网.2020 年我国快递业务量将超 700 亿 [EB/OL]. <http://society.people.com.cn/n1/2020/0106/c1008-31536582.html>. People's Daily Online. my country's express delivery business volume will exceed 70billion in 2020 [EB/OL].
- [2] 李梦焯,张媛,朱磊,等.聚乳酸在快递包装应用中的可行性研究[J]. 绿色包装, 2017,32(11):37-41.
Li M Y, Zhang Y, Zhu L, et al. Feasibility study on PLA in express packaging application [J]. Green Package, 2017,32(11):37-41.
- [3] 游伴奏.环保包装材料在电子商务物流包装上的创新应用[J]. 今日印刷, 2020,19(2):45-48.
You B Z. Innovative application of environmentally friendly packaging materials in e-commerce logistics packaging [J]. Printing Today, 2020,19(2):45-48.
- [4] 刘芳卫,把宁,赵真真,等.快递包装用生物可降解材质的分析介绍[J]. 塑料包装, 2019,29(2):16-18.
Liu F W, Ba N, Zhao Z Z, et al. Introduction of biodegradable materials for express packaging [J]. Plastics Packaging, 2019,29(2): 16-18.
- [5] Duan H, Song G, Qu S, et al. Post-consumer packaging waste from delivery in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019,144(1):137-143.
- [6] Yi Y, Wang Z, Wennersten R, et al. Life cycle assessment of delivery packages in China [J]. Energy Procedia, 2017,105(3):3711-3719.
- [7] Fan W, Xu M, Dong X, et al. Considerable environmental impact of the rapid development of China's express delivery industry [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017,126(41):174-176.
- [8] Rossi V, Cleeve-Edwards N, Lundquist L, et al., Life cycle assessment of end-of-life options for two biodegradable packaging materials: sound application of the European waste hierarchy [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,86(49):132-145.
- [9] Cosate De Andrade M F, Souza P M S, Cavalett O, et al. Life cycle assessment of poly(lactic acid) (PLA): Comparison between chemical recycling, mechanical recycling and composting [J]. Journal of Polymers and the Environment, 2016,24(4):372-384.
- [10] Huijbregts M A J, Rombouts L J A, Hellweg S, et al. Is cumulative fossil energy demand a useful indicator for the environmental

- performance of products [J]. *Environ Sci Technol*, 2006,40(3):641–648.
- [11] Scipioni A, Niero M, Monia N, Mazzi A, et al. Significance of the use of non-renewable fossil CED as proxy indicator for screening LCA in the beverage packaging sector [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013,18(3):673–682.
- [12] Frischknecht R, Wyss F, Büsser Knöpfel S, et al. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015,20(7):957–969.
- [13] Finkbeiner M, Inaba A, Tan R B T, et al. The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044 [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006,11(2): 80–85.
- [14] 谢明辉,李 丽,乔 琦,等.塑料牛奶包装及处置方式生命周期环境影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(11):1924–1930.
- Xie M H, Li L, Qiao Q, et al. Environmental impacts from milk plastic package and waste treatments of entire life cycle [J]. *China Environmental Science*, 2011,31(11):1924–1930.
- [15] Jang Y, Lee G, Kwon Y, et al. Recycling and management practices of plastic packaging waste towards a circular economy in South Korea [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020,158:104798.
- [16] 黄和平,胡 晴,王智鹏,等.南昌市生活垃圾卫生填埋生命周期评价 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(10):3844–3852.
- Huang H P, Hu Q, Wang Z P, et al. Life cycle assessment of sanitary landfill of municipl soild waste in Nanchang [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020,158:104798.
- [17] 任 越,杨俊杰.生活垃圾分类处理方式的生态效率评价 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(10):3844–3852.
- Ren Y, Yang J J. Eco-efficiency assessment of municipal soild waste sorting treatment mode [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,38(10):3844–3852.
- [18] Madhavan K M, Nair N R, John R P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research [J]. *Bioresour Technol*, 2010,101:8493–8501.
- [19] 国家统计局.中国统计年鉴 2018 [M]. 北京:中国统计出版社, 2019:8–20.
- National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook 2018* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019:8–20.
- [20] 段 宁,程胜高.生命周期评价方法体系及其对比分 [J]. *安徽农业科学*, 2008,36(32):13923–13925,14049.
- Duan N, Cheng S G. Outline and contrast analysis of life cycle assessment methodologies [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008,36(32):13923–13925,14049.
- [21] 国家统计局.中国能源统计年鉴 2016 [M]. 北京:中国统计出版社, 2017:96–101.
- National Bureau of Statistics. *China energy statistical yearbook 2016* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017:96–101.
- [22] 刘晓莉.涂料行业 VOCs 来源与治理技术研究 [J]. *节能*, 2019, 38(6):74–76.
- Liu X L. Research on the source and treatment technology of VOCs in the coating industry [J]. *Energy Conservation*, 2019,38(6):74–76.
- [23] 叶富鹏.聚乳酸生命周期中 CO₂ 的评价 [J]. *能源与节能*, 2016, 09:80–81.
- Ye F P. LCA on CO₂ from PLA [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2016,09:80–81.
- [24] Vink E T H, Rábago K R, Glassner D A, et al. Applications of life cycle assessment to Nature Works™ polylactide (PLA) production [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2003,80(3):403–19.
- [25] 郑 霞,李新功,吴义强.聚乳酸自然降解性能 [J]. *功能材料*, 2014, 45(14):14099–14102.
- Zheng X, Li X G, Wu Y Q. Natural degradation properties of polylactide [J]. *Functional Materials*, 2014,45(14):14099–14102.
- [26] Kolstad J, Vink E T H, Wilde B D, et al. Assessment of anaerobic degradation of Ingeo™ polylactides under accelerated landfill conditions [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012,97(9):1131–1141.
- [27] 蒋海斌,张晓红,乔金樑.废旧塑料回收技术的研究进展 [J]. *合成树脂及塑料*, 2019,36(3):76–80.
- Jiang H B, Zhang X H, Qiao J L. Recycling technologies for waste plastic [J]. *China Synthetic Resins and Plastics*, 2019,36(3):76–80.

作者简介: 史 玉(1996–), 女, 河北石家庄人, 大连理工大学环境学院研究生, 主要从事产业生态学研究。