

禁塑令背景下不同材质吸管环境友好性比较研究^{*}

邵雅婷 徐 凌[#] 陈 郁

(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 禁塑令背景下,以质轻、面广、细小的吸管为研究对象,运用生命周期评价(LCA)方法从产品的生产、运输、处置3个方面对聚丙烯(PP)吸管、聚乳酸(PLA)吸管、纸吸管的环境友好性进行比较,并对其碳足迹展开讨论。计算得出3种吸管总环境影响为PP吸管>纸吸管>PLA吸管,PLA吸管和纸吸管相对于PP吸管总环境影响分别下降了53.86%、32.41%。生产、运输、处置阶段环境影响最大的分别为PP吸管、纸吸管、纸吸管。3种吸管碳排放总量为纸吸管>PP吸管>PLA吸管,PP吸管碳排放总量是PLA吸管的2.5倍。可以通过减小纸吸管质量、加大垃圾分类力度、提高焚烧比例、控制产品运输距离提高可降解吸管的环境友好性。

关键词 吸管 禁塑令 生命周期评价 碳足迹 环境影响

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.07.017

Comparative study on environmental friendliness of drinking straws with different materials under the background of plastic ban SHAO Yating, XU Ling, CHEN Yu. (School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, MOE, Dalian Liaoning 116024)

Abstract: Small drinking straws with light weight and wide range of use were taken as research objects under the background of the plastic ban. The environmental friendliness of PP straws, PLA straws and paper straws was compared by using life cycle assessment (LCA) method from aspects of production, transportation and treatment stages, and the carbon footprint was discussed. The total environmental impact of the three kinds of drinking straws showed PP straws>paper straws>PLA straws. Compared with PP straws, the total environmental impact of PLA straws and paper straws decreased by 53.86% and 32.41%, respectively. PP straws had the greatest environmental impact in the production stage, while paper straws had the greatest environmental impact in both transportation and treatment stages. The total carbon emissions of the three kinds of straws showed paper straws>PP straws>PLA straws. The carbon emission of PP drinking straws was 2.5 times that of PLA straws. It was concluded that the environmental friendliness of the degradable straws could be improved by reducing the weight of the paper straws, increasing the intensity of garbage classification, improving the proportion of incineration, and controlling the transportation distance of the products.

Keywords: drinking straws; plastic ban; life cycle assessment; carbon footprint; environmental impact

塑料制品因其质轻、防水、价廉的优点快速成为大众日常生活中的必需品,与此同时,塑料垃圾占比从1960年的不到1%增加到如今的12%^[1]。我国是全球最大的塑料生产国^[2],塑料产量与世界塑料产量的比值逐步攀升^[3]。由于塑料过度使用以及混乱的处置丢弃现状,正规有效资源化回收利用的塑料垃圾不足总量的10%^[4],越来越多的塑料垃圾进入自然环境,威胁人类健康和全球可持续发展。近年来微塑料对海洋、陆地、大气乃至生物造成的不可逆伤害^[5-6]得到广泛重视。

塑料袋等塑料包装占有塑料制品产量的35%~45%,塑料吸管的使用量也占据了很大的比例^[7]。据统计,美国每天丢弃大约5亿根塑料吸管^[8],英国每年使用47亿根塑料吸管^[9],2019年我国塑料制品累计产量8184万t,其中塑料吸管近3万t^[10],不妥当的废弃处置使其成为环境保护的一大难题^[11]。2020年我国发布了“最严禁塑令”^[12],明确规定禁止使用不可降解一次性塑料吸管,要求完善并推动塑料替代产品的开发以及推广,实现不可降解塑料的“清零”,吸管界的“改革”成为关注

第一作者:邵雅婷,女,1998年生,硕士研究生,主要从事生命周期评价研究。[#] 通讯作者。

^{*} 中央高校基本科研业务费资助项目(No.DUT20LAB304)。

热点。

塑料是以高分子聚合物为主要原料,加入助剂制得的有机高分子材料^[13],现有的塑料制品大多以聚乙烯或聚丙烯(PP)为主要原料。目前所推崇的塑料替代品为生物可降解材料和纸制品。生物可降解材料是指具有优良的使用性能、废弃后能够被环境微生物所降解并最终实现无机化的高分子材料^[14],如聚乳酸(PLA)^[15]。纸制品主要由树脂合成,常用的有瓦楞纸和牛皮纸。

国外相关研究分析了不同材质吸管的持续性以及对海洋生态系统的影响^[16-17],但在分析时没有考虑运输阶段,废弃处置方式也不符合我国实情。ROY 等^[18]通过回顾 150 篇关于吸管的文献,总结了不同类型吸管对经济、环境、社会方面的影响,其中对环境方面的影响主要集中于全球变暖潜能(GWP)。FAHIM 等^[19]认为使用生物基塑料替代化石基塑料,可以在制造阶段减少 80% 的能源消耗,从而降低与其生产相关的温室气体排放;HOGE^[20]、TAKOU 等^[21]也认同生物可降解吸管在部分类别中优于纸吸管和塑料吸管。但 ROY 等^[18]在比较中认为除化石燃料消耗外,塑料吸管在其他环境影响上优于 PLA 吸管,因为 PLA 生产过程比 PP 消耗更多的能源,并在 MORAN^[22]的研究基础上指出 GWP 环境影响的广泛变化可能归因于原材料、系统边界、技术、运输的选择等。PORTA^[23]说明了吸管不进行分类回收研究的一大原因,便是吸管质轻、细小,往往会被丢弃到环境中或直接混合填埋处理。结合各国实际和政策的变动,ROY 等^[18]总结出废物管理不足和塑料废物的国际贸易在一定程度上导致吸管成为塑料污染的重要来源,应用一种系统化的替代方案减弱环境污染。除此之外,MOY 等^[24]比较了 PLA 吸管和纸吸管的全生命周期环境影响,认为在某些类别上 PLA 吸管优于纸吸管;CHITAKA 等^[25]认为纸吸管是一次性吸管中最优的选择;GAO 等^[26]认为纸吸管优于 PLA 吸管。目前我国学者大多集中于塑料、生物可降解材料的其他产品生命周期或材料本身^[27-31]的研究,吸管作为日常生活中使用最广的塑料产品之一

却没有较多的研究,其中,纸制品的生命周期研究主要集中在瓦楞原纸^[32]、瓦楞纸包装^[33-34]上,也有对生产过程的碳足迹^[35-36]、水足迹^[37]等进行研究。

本研究对 PP 吸管、纸吸管、PLA 吸管 3 种不同材质的一次性吸管进行生命周期评价(LCA),从产品生产、运输到最终的废弃处置,采用 GaBi 软件和 CML 2001 模型评价方法进行数据处理,计算 PP 吸管、纸吸管、PLA 吸管的环境友好性以及碳足迹分布,说明在不同影响类别下 3 种吸管的影响差异,为塑料制品及其替代品方面的研究提供一定的借鉴。

1 研究方法内容

LCA 被定义为“对一个产品系统的生命周期中输入、输出潜在环境影响的汇编”^[38],常用于评估人类生产消费活动。本研究遵循 LCA 的 4 个步骤(目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释),对不同材质吸管进行研究。

1.1 研究对象及范围

考虑吸管实际使用情况以及厂家生产规模,加之对门店的采访,研究对象为 PP 吸管、PLA 吸管和纸吸管。运用 GaBi 软件对 3 种吸管的生产、运输、处置阶段建立评价模型,通过比较分析物质、能源的输入以及固体废弃物、废水等输出,依次计算其对生态环境的影响。根据《聚丙烯饮用吸管》(GB/T 24693—2009)、《聚乳酸冷饮吸管》(QB/T 4633—2014)、《一次性纸质饮用吸管》(T/ZZB 1494—2019)以及市场调研,确定所研究的 3 种吸管单支主要特征(见表 1)。

1.1.1 功能单位

功能单位为吸入 0.5×10^8 L 液体所使用的吸管,PP 吸管和 PLA 吸管的总质量约为 60 t,纸质吸管总质量约为 108 t。

1.1.2 系统边界

本研究不包括吸管使用阶段,因为研究对象均为一次性吸管,不存在重复利用,且吸管在使用过程中没有对环境造成明显的物质和能量损耗;处置阶段以焚烧和填埋为主。水、电、燃料等作为系统边界

表 1 不同材质吸管的主要特征

Table 1 The main characteristics of drinking straws with different materials

指标	PP 吸管	PLA 吸管	纸吸管
主要材质	PP	PLA	牛皮纸
规格	Φ7.0 mm×210 mm	Φ6.6 mm×210 mm	Φ6.0 mm×197 mm
可否重复使用	否	否	否

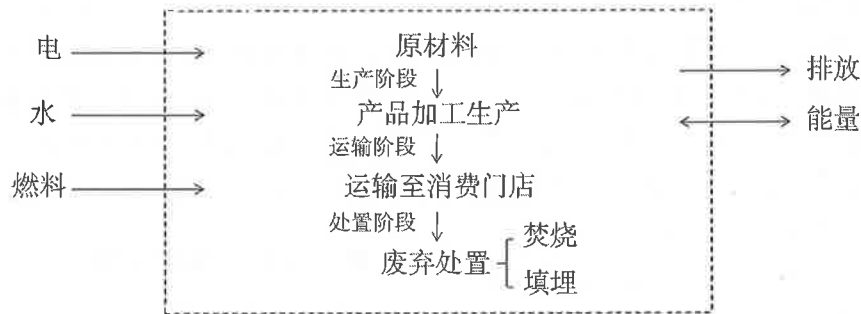


图1 系统边界
Fig.1 System boundary

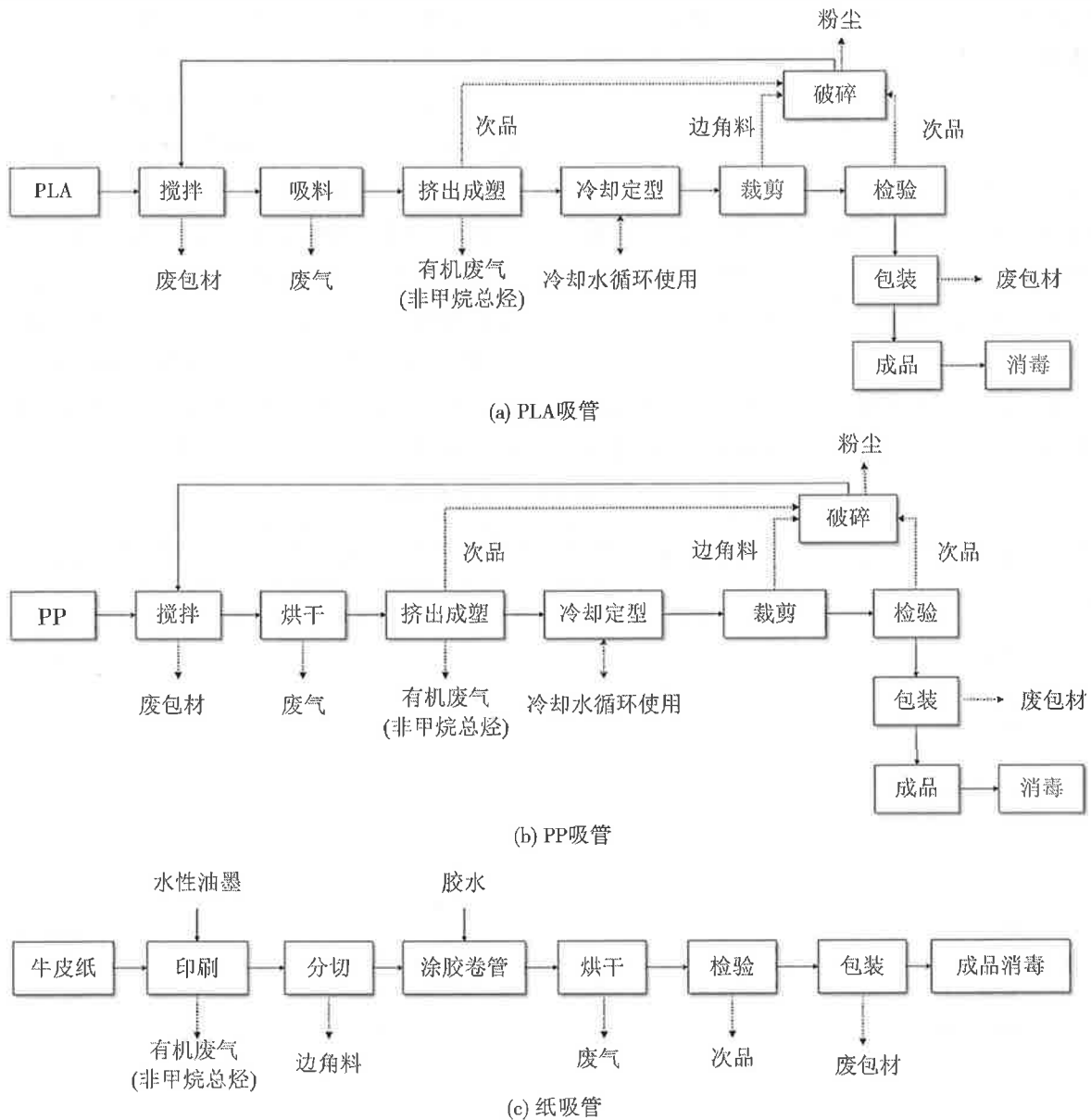


图2 PLA吸管、PP吸管和纸吸管的生产工艺流程
Fig.2 Manufacturing of PLA straws, PP straws and paper straws

的输入,环境排放(废水、废气、固体废物)作为系统边界的输出(见图1),由于不同材质吸管生产工艺的差异性,生产阶段主要输入输出过程见图2。

1.1.3 说明和假设

为更好界定系统边界以及研究内容,进行如下说明和假设:(1)产品加工阶段不考虑噪声污染问题。(2)运输阶段只考虑产品到商家的距离,不考虑

原材料到加工厂的运输,由于吸管使用后丢弃杂乱且废弃物分类状态较差,故也不考虑吸管废弃后到填埋场或焚烧厂的距离。(3)处置阶段只考虑焚烧以及填埋处理,按照近5年中国城市生活垃圾处理比例^[39]趋势假定吸管在不考虑破碎回用的前提下,焚烧与填埋比例分别为60%、40%。(4)假设吸管使用一次之后即废弃,消费者不会对其进行回用。

尽管纸质材料回收率高,但此处 3 类吸管都不进行回收研究(一是卫生问题;二是吸管废弃后较为分散,回收成本高于制作成本,商家不愿意回收^[40];三是纸质吸管使用后发胀变软,不利于回收)。(5)假设吸管单独包装,且外包装材料与吸管本身材料相同,依据为环评报告中包装材料与原材料一致。(6)吸管加工过程中冷却水循环使用不外排,不考虑循环水对环境的影响。(7)不考虑加工厂基础设施投入、维修等对环境的影响。(8)当某种原料质量低于产品总质量的 1%时,可忽略对该原料的评价,但总忽略量不能超过 5%(会产生严重环境污染的原料除外)^[41]。

1.2 清单分析

生产阶段输入输出清单见表 2,数据来源于环评报告、调研以及 GaBi 软件内置的数据库。运输阶段距离的确定以大连市某奶茶店为例,调研其吸管厂商到大连市所有门店的平均距离,取 770 km。

1.3 研究方法

LCA 方法可以分为面向问题的方法(中点法)和损害为主的方法(终点法)^[148-151],两类方法分别以

CML 2001 模型^[44]和 Eco-indicator 99 模型^[45]为代表。本研究采用 CML 2001 模型(其影响类别见表 3)进行评价,CML 2001 模型将定量建模限制在因果链的早期阶段,降低评价的不确定性,可以全面地评估产品对环境的影响,适用于对吸管的评价研究。

2 影响评价及结果解释

根据已构建的吸管 LCA 模型,将清单数据输入到 GaBi 软件中,计算出归一化后各类影响类别的环境影响潜值(见表 4),运用 CML 2001 模型进行归一化和加权处理,结果见图 3。

整体上看,总环境影响表现为 PP 吸管>纸吸管>PLA 吸管。PLA 吸管和纸吸管相对于 PP 吸管总环境影响分别下降了 53.86%、32.41%,可以认为 PLA 吸管、纸吸管是良好的替代材料。影响较大的类别是 MAETP、GWP、ADP_f,PLA 吸管 ODP 为负值说明其在全过程中可以避免产生臭氧耗竭效应,原因在于 PLA 吸管处置阶段对 ODP 表现为环境友好性,中和了生产运输阶段产生的影响,使得全生命周期上对 ODP 表现出规避性。

表 2 1 亿根吸管生产阶段的数据清单
 Table 2 Life cycle inventory for producing 100 million drinking straws

项目	PP 吸管	PLA 吸管	纸吸管
PP/t	62.40		
PLA/t		61.00	
牛皮纸/t			108.34
色母粒/t	0.9		
液压油/t	0.12		
胶水/t			0.67
水性油墨/t			0.14
水/t	125	26	240
电/(kW·h)	36 000	19 200	16 667
非甲烷总烃/kg	14.40	14.64	5.17
颗粒物/t	0.006	0.001	0.960
COD/kg	30.00	8.10	7.70
氨氮/kg	2.40	0.73	0.17
BOD ₅ /kg		4.86	
水中悬浮物/kg		6.48	
一般工业固体废物/t	2.03	1.43	2.52
危险废物/t	0.48	0.06	0.26

表 3 CML 2001 模型影响类别及单位
 Table 3 Impact categories and units of CML 2001 model

影响类别	单位	影响类别	单位
非生物资源耗竭潜能(ADP _e)	kg(以 Sb 为当量)	人类毒性(HTP)	kg(以二氯苯为当量)
非生物消耗化石资源(ADP _f)	MJ	海洋水生生态毒性(MAETP)	kg(以二氯苯为当量)
酸化潜能(AP)	kg(以 SO ₂ 为当量)	臭氧耗竭潜能(ODP)	kg(以一氟三氯甲烷为当量)
水体富营养化潜能(EP)	kg(以 PO ₄ ³⁻ 为当量)	光化学烟雾生成潜能(POCP)	kg(以乙烯为当量)
淡水水生生态毒性(FAETP)	kg(以二氯苯为当量)	陆地生态毒性(TETP)	kg(以二氯苯为当量)
GWP	kg(以 CO ₂ 为当量)		

表 4 不同材质吸管各影响类别下的环境影响潜值
Table 4 The environmental impact potential of different material drinking straws under each impact category

影响类别	PP 吸管	PLA 吸管	纸吸管
ADP _e	4.24×10^{-10}	1.46×10^{-9}	2.83×10^{-10}
ADP _f	7.90×10^{-8}	4.13×10^{-8}	1.60×10^{-8}
AP	6.21×10^{-9}	1.23×10^{-8}	7.14×10^{-9}
EP	1.45×10^{-9}	5.33×10^{-9}	3.72×10^{-9}
FAETP	3.70×10^{-9}	4.17×10^{-8}	6.39×10^{-10}
GWP	5.27×10^{-8}	2.10×10^{-8}	7.37×10^{-8}
HTP	2.17×10^{-8}	1.70×10^{-8}	1.12×10^{-8}
MAETP	2.81×10^{-7}	6.03×10^{-8}	1.87×10^{-7}
ODP	1.06×10^{-17}	-1.57×10^{-11}	1.50×10^{-12}
POCP	5.22×10^{-9}	6.50×10^{-9}	5.64×10^{-9}
TETP	2.45×10^{-9}	3.66×10^{-9}	1.10×10^{-9}

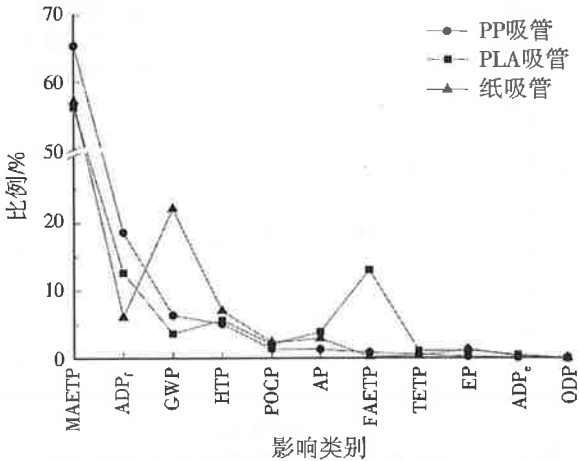


图 4 生产阶段不同材质吸管各影响类别比例
Fig.4 The proportion of each impact category of drinking straws with different materials in the production stage

料的生物基聚合物^[47],与其他石油基聚合物相比, PLA 生产过程产生的净温室气体排放更少,消耗的不可再生能源也减少,但对 POCP、AP、EP 影响较大。虽然生产阶段纸吸管所用原料量最多,但结果显示该阶段纸吸管的总环境影响最小。

2.1.2 运输阶段

结合表 6 和图 5 可以看出,运输阶段 3 种吸管的总环境影响表现为纸吸管>PLA 吸管、PP 吸管,影响最大的类别是 MAETP。3 种吸管的运输采用同种方式同等距离,故不同材质吸管同一影响类别所占总环境影响的比例基本相同。相同功能单位下纸吸管质量较大,因此其环境影响潜值较为突出。MAETP、ADP_f、GWP 偏高主要是因为运输阶段以生物-化石柴油混合为原料,化石燃料燃烧产生温室气体影响生态质量,但生物柴油是以废油脂和植物油为原料,其混合添加使得燃烧阶段硫化物、一氧化碳排放以及挥发性有机物的产生大大减少^[48], POCP 表现为负值。

表 6 运输阶段不同材质吸管环境影响潜值

Table 6 The environmental impact potential of drinking straws with different materials in the transportation stage

影响类别	PP 吸管	PLA 吸管	纸吸管
ADP _e	7.99×10^{-12}	7.99×10^{-12}	1.41×10^{-11}
ADP _f	1.34×10^{-9}	1.34×10^{-9}	2.36×10^{-9}
AP	3.18×10^{-10}	3.18×10^{-10}	5.61×10^{-10}
EP	1.28×10^{-10}	1.28×10^{-10}	2.26×10^{-10}
FAETP	8.13×10^{-11}	8.13×10^{-11}	1.44×10^{-10}
GWP	1.19×10^{-9}	1.19×10^{-9}	2.10×10^{-9}
HTP	2.94×10^{-10}	2.94×10^{-10}	5.20×10^{-10}
MAETP	3.01×10^{-9}	3.01×10^{-9}	5.32×10^{-9}
ODP	2.39×10^{-20}	2.39×10^{-20}	4.23×10^{-20}
POCP	-7.65×10^{-10}	-7.65×10^{-10}	-1.35×10^{-9}
TETP	7.56×10^{-11}	7.56×10^{-11}	1.34×10^{-10}

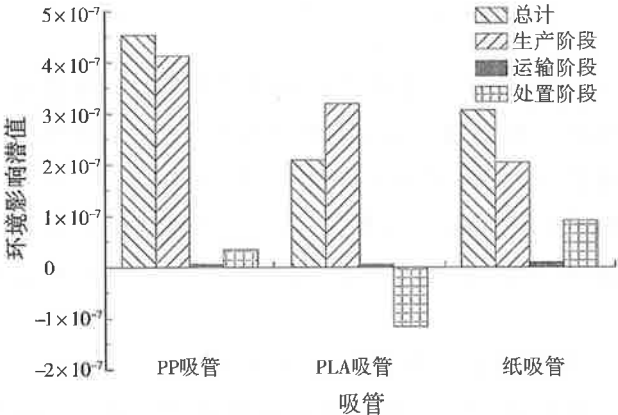


图 3 不同材质吸管不同阶段环境影响潜值
Fig.3 The environmental impact potential at different stages of drinking straws with different materials

2.1 同一阶段不同材质吸管环境影响分析

2.1.1 生产阶段

结合表 5 和图 4 可以看出,生产阶段 3 种吸管的总环境影响为 PP 吸管>PLA 吸管>纸吸管,影响最大的类别是 MAETP,具有同等趋势的类别还有 ADP_f、HTP,主要原因为用电量的差异^[46]; FAETP、AP、POCP、EP、TETP、ADP_e、ODP 均为 PLA 吸管最大。本研究中 PLA 吸管是以玉米为原

表 5 生产阶段不同材质吸管环境影响潜值

Table 5 The environmental impact potential of drinking straws with different materials in the production stage

影响类别	PP 吸管	PLA 吸管	纸吸管
ADP _e	3.97×10^{-10}	1.50×10^{-9}	6.08×10^{-10}
ADP _f	7.69×10^{-8}	4.05×10^{-8}	1.25×10^{-8}
AP	5.52×10^{-9}	1.25×10^{-8}	6.04×10^{-9}
EP	1.04×10^{-9}	3.87×10^{-9}	2.70×10^{-9}
FAETP	3.59×10^{-9}	4.17×10^{-8}	5.25×10^{-10}
GWP	2.63×10^{-8}	1.18×10^{-8}	4.53×10^{-8}
HTP	2.11×10^{-8}	1.81×10^{-8}	1.44×10^{-8}
MAETP	2.70×10^{-7}	1.80×10^{-7}	1.17×10^{-7}
ODP	9.93×10^{-18}	6.65×10^{-13}	4.71×10^{-14}
POCP	5.77×10^{-9}	6.74×10^{-9}	4.85×10^{-9}
TETP	2.16×10^{-9}	3.48×10^{-9}	7.08×10^{-10}

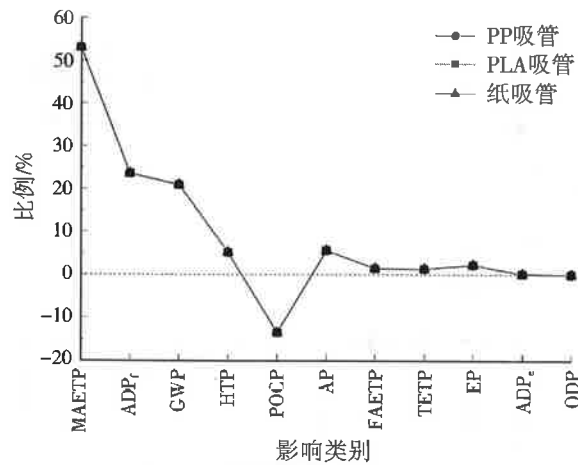


图 5 运输阶段不同材质吸管各影响类别比例

Fig.5 The proportion of each impact category of drinking straws with different materials in the transportation stage

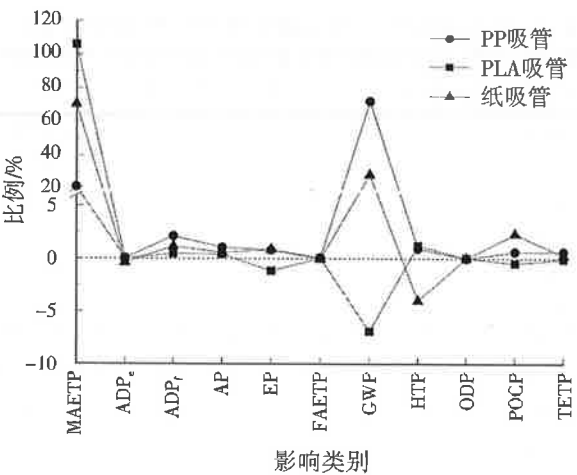


图 6 处置阶段不同材质吸管各影响类别比例

Fig.6 The proportion of each impact category of drinking straws with different materials in the treatment stage

2.1.3 处置阶段

结合表 7 和图 6 可以看出,处置阶段 3 种吸管的总环境影响表现为纸吸管>PP 吸管>PLA 吸管,影响较大的类别是 GWP、MAETP。其中 PLA 吸管 MAETP、ADP_f、AP、HTP、ADP_e、FAETP、ODP 指标均为负值,可认为 PLA 吸管在一定比例焚烧、填埋的处置情况下可以避免这 7 种环境影响,可能是由于 PLA 优良的生物可降解性使其在焚烧时不产生有害气体,填埋时对环境负担很小^[49],且 PLA 原料为玉米,让其在 ADP_e、ADP_f的环境问题上表现了规避性。同理,纸吸管在处置过程不会产生资源耗竭的问题,也减少了对人体健康造成的伤害,这是因为牛皮纸本质由纤维素构成,纤维素可以被降解并被自然回用,从而避免对人体健康和环境造成危害,但在 GWP、MAETP、ADP_f、AP 等类别上纸吸管环境友好性最差。综合来看,PLA 吸管在焚烧、填埋处置过程中是明显优于 PP 吸管和纸吸管的。

表 7 处置阶段不同材质吸管环境影响潜值

Table 7 The environmental impact potential of drinking straws with different materials in the treatment stage

影响类别	PP 吸管	PLA 吸管	纸吸管
ADP _e	1.92×10 ⁻¹¹	-4.43×10 ⁻¹¹	-3.38×10 ⁻¹⁰
ADP _f	7.45×10 ⁻¹⁰	-5.39×10 ⁻¹⁰	1.07×10 ⁻⁹
AP	3.73×10 ⁻¹⁰	-4.83×10 ⁻¹⁰	5.37×10 ⁻¹⁰
EP	2.88×10 ⁻¹⁰	1.33×10 ⁻⁹	7.98×10 ⁻¹⁰
FAETP	2.87×10 ⁻¹¹	-3.63×10 ⁻¹¹	-2.99×10 ⁻¹¹
GWP	2.53×10 ⁻⁸	7.98×10 ⁻⁹	2.63×10 ⁻⁸
HTP	3.26×10 ⁻¹⁰	-1.44×10 ⁻⁹	-3.67×10 ⁻⁹
MAETP	7.49×10 ⁻⁹	-1.23×10 ⁻⁷	6.46×10 ⁻⁸
ODP	6.61×10 ⁻¹⁹	-1.64×10 ⁻¹¹	1.45×10 ⁻¹²
POCP	2.19×10 ⁻¹⁰	5.25×10 ⁻¹⁰	2.14×10 ⁻⁹
TETP	2.22×10 ⁻¹⁰	9.74×10 ⁻¹¹	2.56×10 ⁻¹⁰

表 8 不同材质吸管的碳排放量

Table 8 Carbon emissions of different material drinking straws

吸管	生产阶段	运输阶段	处置阶段	
			焚烧	填埋
PP 吸管	119 060	5 382	113 000	1 610
纸吸管	204 902	9 518	68 000	51 300
PLA 吸管	53 431	5 382	18 100	18 100

害,这是因为牛皮纸本质由纤维素构成,纤维素可以被降解并被自然回用,从而避免对人体健康和环境造成危害,但在 GWP、MAETP、ADP_f、AP 等类别上纸吸管环境友好性最差。综合来看,PLA 吸管在焚烧、填埋处置过程中是明显优于 PP 吸管和纸吸管的。

2.2 不同材质吸管碳足迹分析

将 CML 2001 模型计算结果中的 GWP 指标进行单独分析,3 种吸管的碳排放总量表现为:纸吸管>PP 吸管>PLA 吸管,且 PP 吸管碳排放总量是 PLA 吸管的 2.5 倍(见表 8)。PLA 吸管在处置阶段产生的温室气体排放量是 3 种吸管中最少的,PLA 燃烧热值与焚化纸类相同,是传统塑料的一半,且不会释放出氮化物、硫化物等有毒气体^[50],综合考虑得出 PLA 产品在 GWP 下最佳处置方式是焚烧。

总体上来看,运输阶段不是主要的碳排放阶段,PP 吸管、纸吸管与 PLA 吸管运输阶段碳排放量占比分别为 2.25%、2.85%、5.67%。3 种吸管碳排放的主要阶段都是生产阶段,PP 吸管、纸吸管与 PLA 吸管碳排放量占比分别为 49.81%、61.40%、56.24%。

3 结论与建议

(1) 3 种材质一次性吸管总环境影响为:PP 吸

管>纸吸管>PLA 吸管。替代产品 PLA 吸管和纸吸管相对于 PP 吸管总环境影响分别下降了 53.86%、32.41%。

(2) 生产阶段 3 种吸管的总环境影响表现为: PP 吸管>PLA 吸管>纸吸管, 主要影响类别为 MAETP, PLA 吸管虽然在生产过程中产生较少的温室气体, 但对 POCP、AP、EP 影响较大。

(3) 运输阶段 3 种吸管的总环境影响表现为: 纸吸管>PLA 吸管、PP 吸管, 主要影响类别为 MAETP, 纸吸管由于质量原因环境影响潜值较大。

(4) 处置阶段 3 种吸管的总环境影响表现为: 纸吸管>PP 吸管>PLA 吸管, 主要影响类别为 GWP 和 MAETP。PLA 吸管材质的优良性使其在焚烧、填埋处置过程中明显优于 PP 吸管和纸吸管。

(5) 3 种吸管的碳排放总量表现为: 纸吸管>PP 吸管>PLA 吸管, PP 吸管碳排放总量是 PLA 吸管的 2.5 倍, 3 种吸管主要碳排放阶段都为生产阶段。可以通过减小纸吸管质量、加大垃圾分类力度、提高焚烧比例、控制产品运输距离提高可降解吸管的环境友好性。

参考文献:

- [1] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): 1700782.
- [2] 安立会, 李欢, 王菲菲, 等. 海洋塑料垃圾污染国际治理进程与对策[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(6): 1334-1340.
- [3] 许江菱. 2019~2020 年世界塑料工业进展(I): 通用塑料[J]. *塑料工业*, 2021, 49(3): 1-9.
- [4] LEE A, LIEW M S. Tertiary recycling of plastics waste: an analysis of feedstock, chemical and biological degradation methods[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2020, 23(1): 32-43.
- [5] 刘超, 张晓然, 刘俊峰, 等. 塑料制品中微塑料的释放行为及在环境中的迁移规律研究进展[J]. *环境工程*, 2022, 40(5): 205-217.
- [6] DANOPOULOS E, JENNER L C, TWIDDY M, et al. Microplastic contamination of seafood intended for human consumption: a systematic review and meta-analysis[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2020, 128(12): 126002.
- [7] 李道季. 海洋微塑料污染状况及其应对措施建议[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(2): 197-202.
- [8] 陈妍凌. 禁塑, 从塑料吸管开始[J]. *环境经济*, 2018(15): 24-25.
- [9] 王光镇, 丁问微, 刘鸿志. 英国塑料污染防治对策与《英国塑料公约》的进展[J]. *世界环境*, 2020(4): 74-77.
- [10] 国家发展和改革委员会环资司. 别了, 塑料吸管! [EB/OL]. [2022-08-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztlz/sl-wrslzxd/202101/t20210112_1318974.html.
- [11] LUAN X Y, KOU X H, ZHANG L, et al. Estimation and prediction of plastic losses to the environment in China from 1950 to 2050 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 184: 106386.
- [12] 国家发展和改革委员会, 生态环境部. 关于进一步加强塑料污染治理的意见[EB/OL]. [2022-08-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-01/20/content_5470895.htm.
- [13] 王绍云. 生活中塑料制品的应用与识别[J]. *化工设计通讯*, 2020, 46(6): 246-267.
- [14] MADHAVAN K M, NAIR N R, JOHN R P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 8493-8501.
- [15] GHOMI E R, KHOSRAVI F, ARDAHAIE A S, et al. The life cycle assessment for polylactic acid (PLA) to make it a low-carbon material[J]. *Polymers*, 2021, 13(11): 1854.
- [16] ZANGHELINI G M, CHERUBINI E, DIAS R, et al. Comparative life cycle assessment of drinking straws in Brazil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123070.
- [17] CHANG L, TAN J. An integrated sustainability assessment of drinking straws[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105527.
- [18] ROY P, ASHTON L, CORRADINI M G, et al. Evolution of drinking straws and their environmental, economic and societal implications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316.
- [19] FAHIM I S, CHBIB H, MAHMOUD H M. The synthesis, production & economic feasibility of manufacturing PLA from agricultural waste[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2019, 12: 100142.
- [20] HOGE S K. Consequential life cycle assessment of banning single use plastics within the EU[EB/OL]. [2022-08-20]. <https://web.archive.org/web/20200531073911/http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2/1366649/FULLTEXT02.pdf>.
- [21] TAKOU V, BOLDRIN A, ASTRUP T F, et al. LCA of single use plastic products in Denmark[R]. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency, 2019.
- [22] MORAN M E. An environmental and cost comparison between polypropylene plastic drinking straws and a "greener" alternative: an oberlin case study[EB/OL]. [2022-08-20]. <https://digitalcommons.oberlin.edu/honors/169>.
- [23] PORTA R. The plastics sunset and the bio-plastics sunrise[J]. *Coating*, 2019, 9(8): 526.
- [24] MOY C H, TAN L S, SHOPARWE N F, et al. Comparative study of a life cycle assessment for bio-plastic straws and paper straws: Malaysia's perspective[J]. *Processes*, 2021, 9(6): 1007.
- [25] CHITAKA T Y, RUSSO V, VON BLOTTNITZ H. In pursuit of environmentally friendly straws: a comparative life cycle assessment of five straw material options in South Africa[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020, 25(9): 1818-1832.
- [26] GAO A L, WAN Y S. Life cycle assessment of environmental impact of disposable drinking straws: a trade-off analysis with marine litter in the United States[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 817: 153016.
- [27] 申宸昊, 邓义祥, 张嘉戎, 等. 我国塑料污染生命周期管理分析与建议[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(8): 2026-2034.

- [28] YI Y, WANG Z Y, RONALD W, et al. Life cycle assessment of delivery packages in China[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 3711-3719.
- [29] GUO X, YAO Y, ZHAO H L, et al. Environmental impacts of functional fillers in polylactide (PLA)-based bottles using life cycle assessment methodology [J]. Science of the Total Environment, 2021, 788: 147852.
- [30] 李德祥, 李玉坤, 叶蕾, 等. 源于淀粉和纤维素替代材料的 4 类绿色环保餐具评价[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 357-363.
- [31] WANG L P, DONG B, YIN M M. A study of carbon footprint evaluation at PP-R pipe based on life cycle assessment[J]. Advanced Materials Research, 2015, 998/999: 1520-1523.
- [32] 赵国杰, 游亚杰, 黄起帅. 基于生命周期评价的瓦楞原纸产品碳足迹评价[J]. 中国造纸, 2021, 40(8): 40-44.
- [33] 王璟瑶, 吴金卓, 龙占璐. 0201 型瓦楞纸箱生命周期不同阶段的环境影响评价[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 96-102.
- [34] AN X H, LIU P, MENG Q, et al. Research on life cycle environmental property of biomass biodegradable packaging material[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 670/671: 1620-1623.
- [35] ZHAO Q J, DING S, WEN Z M, et al. Energy flows and carbon footprint in the forestry-pulp and paper industry[J]. Forests, 2019, 10(9): 725.
- [36] 李楠, 刘盈, 王震. 国际标准差异对产品碳足迹核算的影响分析——以胶版印刷纸为例[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 707-715.
- [37] MA X T, SHEN X X, QI C C, et al. Energy and carbon coupled water footprint analysis for Kraft wood pulp paper production[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 96: 253-261.
- [38] ISO 14040:2006, Environmental management - life cycle assessment - principles and framework[S].
- [39] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [40] 陈妍凌. 禁用塑料吸管是小题大做? [N]. 中国环境报, 2018-07-23(4).
- [41] JIAO J, LI J, BAI Y. Uncertainty analysis in the life cycle assessment of cassava ethanol in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 438-451.
- [42] BARE J C, GLORIA T P. Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection[J]. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(10): 1021-1035.
- [43] RASHEDI A, KHANAM T. Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by midpoint and end-point indicators of ReCiPe method[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(23): 29075-29090.
- [44] GUINEE J B. Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2001, 7(5): 311-313.
- [45] GOODEKOP M, SPRIENSMAR. The eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment[R]. Amersfoort: Product Ecology Consultants, 1999.
- [46] COASTE DE ANDRADE M F, SOUZA P M S, CAVALETTI 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.
- [47] 曹燕琳, 尹静波, 颜世峰. 生物可降解聚乳酸的改性及其应用研究进展[J]. 高分子通报, 2006, 84(10): 90-97.
- [48] 苏燕, 徐萍. 生物柴油产业发展和相关政策分析[J]. 生物产业技术, 2014(6): 41-46.
- [49] 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: 132-145.
- [50] SUN C, WEI S Y, TAN H Y, et al. Progress in upcycling polylactic acid waste as an alternative carbon source: a review [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 136881.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2022-09-23)

(上接第 998 页)

- [18] HASAN M A A, AHMED M K, AKHAND A A, et al. Toxicological effects and molecular changes due to mercury toxicity in freshwater snakehead (*Channa punctatus* Bloch, 1973) [J]. International Journal of Environmental Research, 2010, 4(1): 91-98.
- [19] WU B, ZHAO D Y, JIA H Y, et al. Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing section, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, 82(4): 405-409.
- [20] VAROL S, DAVRAZ A. Evaluation of potential human health risk and investigation of drinking water quality in Isparta city center (Turkey) [J]. Journal of Water and Health, 2016, 14(3): 471-488.
- [21] 吴蕾, 刘桂建, 周春财, 等. 巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 738-747.
- [22] 张麟杰, 王淦淦, 张利兰, 等. 重庆市河水中粪源微生物污染特征及源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 1253-1260.
- [23] LIU Y, ZHENG B H, FU Q, et al. The selection of monitoring indicators for river water quality assessment[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 129-139.
- [24] 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 等. 雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 782-794.
- [25] 郭晶, 王丑明, 黄代中, 等. 洞庭湖水污染特征及水质评价[J]. 环境化学, 2019, 38(1): 152-160.
- [26] 王军霞, 李莉娜, 陈敏敏, 等. 中国重点污染源总磷、总氮排放状况研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(10): 98-103, 110.
- [27] 程波, 张泽, 陈凌, 等. 太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 118-124.
- [28] 王晓, 张永玲, 曹晓兵, 等. 沛沿河流域土壤施肥后氮、磷释放规律的模拟研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(8): 49-52, 56.
- [29] HUANG C L, YANG Q K, HUANG W D, et al. Hydrological response to precipitation and human activities: a case study in the Zuli River Basin, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(12): 2780.

编辑: 陈锡超 (收稿日期: 2022-04-15)