

源于淀粉和纤维素替代材料的 4 类绿色环保餐具评价

李德祥¹, 李玉坤¹, 叶 蕾², 金征宇¹, 支朝晖², 缪 铭^{1,2*}

¹江南大学 食品科学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 为了比较源于淀粉和纤维素替代材料的环境绩效,以餐饮外卖领域推广使用的生物基餐具(复合淀粉基材料、覆膜纤维基材料)与可降解塑料餐具(全淀粉材料、全纤维材料)为研究对象,分析产品生命周期中的各种资源、能源消耗和环境排放并评价其环境影响。以 1 000 个外卖食品餐盒为基准流,利用环境评估软件建立绿色环保餐具的生命周期评价 LCA 模型。结果表明,源于淀粉的绿色餐盒碳排放和能量消耗主要集中于原料获取和废弃物处理两个阶段,源于纤维的绿色餐盒碳排放和能量消耗则主要集中在制品生产阶段。全淀粉可降解餐具的各项环境影响指标最低,其中累计释放 CO₂ 39.91 kg,消耗电能 332.04 MJ,较全纤维可降解餐盒碳排放降低 69.5%,节约电能 416.23 MJ。

关键词 淀粉; 纤维素; 生物基; 可降解; 生命周期评价; 餐具

文章编号 1009-7848(2022)01-0357-07 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2022.01.039

高分子塑料是重要的基础材料,在社会生产和居民生活中应用广泛。当前全世界高分子塑料年产量达到 2 亿 t,主要通过石化路线获得。由于石油基单体属于非生物基质,自然界中缺乏能够分解这些高分子材料所需的微生物和酶,因此高分子材料在自然界中分解缓慢且会破坏土壤,造成严重的“白色污染”^[1]。同时,由于石油资源的不可再生性及各国“限塑令”的发布,造成塑料产业成本不断上升。为破解经济发展造成的资源环境瓶颈的制约,以生物基材料、生物降解材料替代石油基产品已成为生物产业新一轮的国际竞争热点^[2]。美国、欧盟、日本等发达国家纷纷制定了相应的路线图和行动计划,以天然农林生物质为原料转化制造的绿色环保材料产品竞争力不断提升,应用市场不断扩大。我国政府先后发布了“双碳”及塑料污染治理法规,在餐饮外卖领域推广使用符合性能和食品安全要求的生物基产品、可降解塑料袋等替代产品。淀粉、纤维素作为来源丰富、价格低廉、可再生且可完全降解的天然高分子材料,是最具潜力的天然生物可降解材料^[3-4]。本文采

用生命周期评价(LCA)对生物基餐具(复合淀粉基材料、覆膜纤维基材料)与可降解塑料餐具(全淀粉材料、全纤维材料)4种材料进行环境风险评估(如图 1 所示),并比较 4 类产品的碳排放当量和能源消耗参数,以得到最佳的塑料制品替代方案,使产业链的行为更符合绿色发展的原则,最大程度地减少对环境的不良影响。

1 材料与方法

1.1 方法及评价标准

本研究使用并遵循国际标准化组织(ISO)制定的 ISO14040 指南。该生命周期框架的评估考虑了生命周期的所有阶段,评价内容包括生命周期清单、生命周期影响评估、生命周期解释^[5]。

1.2 功能单元和系统边界

1.2.1 功能单元 为确保研究的科学性,本研究选用 1 000 个容积为 750 mL 的食品餐盒为功能单元。

1.2.2 系统边界 4 种材料外卖餐盒系统边界如图 2 所示。“摇篮到坟墓”的过程包含“摇篮到门”、“门到门”、“门到坟墓”3 个阶段。摇篮到门的部分研究包括原材料的采集,纤维(纸浆)和塑料母粒的合成,产品加工合成直至出厂。纤维基原料(纸浆)的生产加工从树木、芦苇等高纤维植物的种植和收获开始,包括混合和制浆、纸张的生产、纸卷准备、储存 4 个阶段。天然玉米淀粉干燥后先经过

收稿日期: 2021-08-19

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,硕士生

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



图1 4种一次性餐盒的组成和降解特性

Fig.1 Composition and degradation characteristics of four types of disposable lunch box

塑化得到TPS,再与PP共混后得到复合淀粉基材料。“门到门”,该过程发生在外卖餐盒生产工厂内,涵盖餐盒生产的全工艺流程,从原料预处理到餐盒二次加工成型。纤维基餐盒加工从混合纸浆开始,混合纸浆经过净化和精炼除去杂质,随后经压制和干燥辊压干燥。半成品经加热、印刷、切边整形、施胶、灭菌等步骤制成产品^[6]。塑料餐盒,母粒熔融后压延形成片材,片材经适当模具二次冲压成型后得到产品。“门到坟墓”包括外卖餐盒的使用和废弃两个过程。使用过程包括餐盒的运输、包装、销售以及外卖配送。废弃处置方式通常选择焚烧、填埋和回收,满足堆肥条件的塑料餐盒进行堆肥处理。然而,盛放食品的餐具如餐盒、餐勺等使用后存在大量油污,难以回收。填埋会占用大量土地资源,焚烧被认为是垃圾资源化、减量化、无害化处理的有效途径,我国垃圾焚烧近几年正呈上涨态势。高效的垃圾焚烧技术能在有效提升垃圾中能量利用率的同时,减少温室气体排放。

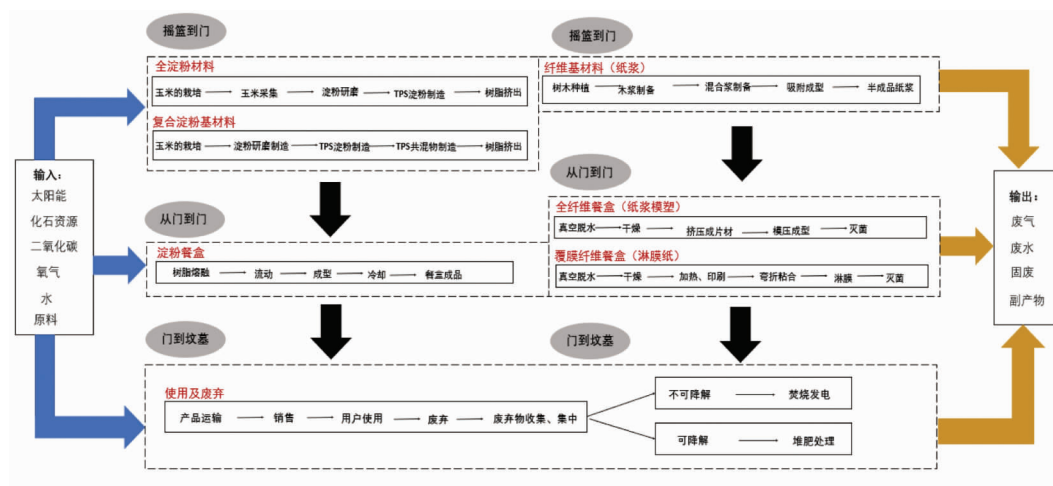


图2 4种一次性餐盒生命周期系统边界

Fig.2 The life cycle system boundary of four types of disposable lunch box

1.3 数据来源及处理

1.3.1 摇篮到门 淀粉餐盒包含原材料采集、加工和树脂挤出过程。共混材料聚丙烯的加工过程包含原油开采、油气精炼、玉米栽培等过程造成的能耗和排放,均源于数据库和文献的背景数据。淀粉的提取和加工从玉米的种植开始,包括玉米收获、运输、磨粉、干燥所需的能耗和排放数据。生命

周期清单的数据来源于文献,其中热塑性淀粉材料数据^[7]共混材料PP数据^[8-9]纤维餐盒则包含树木、草、秸秆种植采集等数据,纸浆原料采集及制备数据^[10-11]。

1.3.2 门到门 淀粉餐盒的制造包括树脂加工和二次成形,涵盖塑料片材的挤出和餐盒热成形排放和能耗数据。本研究采用比热、温差和熔化热值

计算,参考公式:热能耗= $L \times W \times T \times \rho \times (C_p \times \Delta T + \Delta H_f)$ ^[12],式中, L 、 W 、 T 为聚合物片长、宽、厚; ρ 为热塑性淀粉的密度, C_p 为聚合物的比热, ΔT 为聚合物片材与热成型设定温度之间的温差; ΔH_f 为热塑性淀粉树脂的熔化热。假设形成的片材厚度相等,所有容器都使用相同的模具。成型的塑料片材足够生产数量为1个功能单位的1000个一次性餐盒。因淀粉餐盒挤压、传递、干燥过程的设备型号的差异影响能耗及污染气体的排放,故对采集的数据进行理想化处理。树脂二次成型的数据来源于文献[7]~[8]和[10],纸餐盒生产过程包括纸浆真空脱水干燥、热压成型的能耗和排放数据,其中还包括覆膜纤维餐盒的淋膜和镀层过程的能耗。以上数据源于文献[11]和[13]及实景数据。

1.3.3 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。若无背景数据,假设使用32t的卡车运送150km。对于废物处理过程所涉及的运输,假设使用1辆32t卡车运送50km。

复合淀粉基餐盒和覆膜纤维餐盒废弃后不满足堆肥条件,进行焚烧发电。将联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)国家温室气体清单为本文垃圾焚烧的温室气体排放估算方法的参考。焚烧的温室气体排放包括矿物碳焚烧造成的直接碳排放和企业垃圾装运过程中电、热引起的碳排放两

部分。由助燃剂和焚烧厂自身运作消耗的电、热造成的碳排放不作计算。废弃一次性餐盒焚烧温室气体排放量计算见公式(1)~(3)^[14]。如下文公式(1)所示,焚烧净排放量EI由两部分构成,一是垃圾焚烧直接造成的排放 E_i ,另一部分是发电减排量 E_e ,三者单位均为t。其中, E_i 和 E_e 分别根据公式(2)和公式(3)估算。垃圾焚烧再生电能计算方法见公式(4)^[14],式中,热效率 ξ 为20%,厂用电率 ζ 为20%。全淀粉餐盒和全纤维餐盒废弃物满足堆肥条件,堆肥过程造成的能源消耗和碳排放数据来自文献[15]~[17]。

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

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

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

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

1.3.4 生命周期环境影响评价 生命周期环境影响评价(LCIA)是针对资源提取、原料生产、运输、产品加工成型、产品使用和废弃物处理等过程的资源属性和环境属性统计。其中,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6种环境影响类型。文中生命周期环境影响评价数据源于文献,其中淀粉材料源于文献[7]和[18],纤维材料(纸浆)源于文献[19]~[20],6种环境影响类型如表1所示。

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

2 数据分析与讨论

2.1 生命周期清单

两类餐盒生命周期清单如表2和表3所示。得出结论:淀粉餐盒:与生产1000个复合淀粉餐盒相比,使用全淀粉能节省70.59kg不可再生资源。能源方面,节省22.65MJ电能。污染物排放方

面,全淀粉塑料能减少0.41g挥发性有机物和0.02g氮氧化物。纤维餐盒:与生产1000个覆膜纤维餐盒相比,全纤维餐盒能节省2.1kg不可再生资源、30.64MJ电能,减少0.02g挥发性有机物、0.03g二氧化硫、0.26g氮氧化物排放。

表2 淀粉餐盒生命周期清单

Table 2 Life cycle list of starch lunch box

项目	单位	全淀粉材料	复合淀粉基材料
单个质量	g	17.00	15.00
总质量	kg	17.00	15.00
原辅料			
乙烯	kg	0.00	15.31
焦油	kg	0.00	55.28
氢气	kg	0.00	0.01
淀粉	kg	19.67	6.75
滑石粉	kg	0.00	0.01
能源			
电能	MJ	207.56	230.18
排放			
挥发性有机物	g	0.06	0.47
NO _x	g	0.00	0.02
颗粒物	g	0.03	0.03

2.2 环境影响评价

生命周期影响评价结果显示,淀粉餐盒的气体排放值(GWP)、酸化(AP)、富营养化-淡水(EP)、可吸入无机物(RI)等主要指标普遍低于纤维餐盒,其中全淀粉餐盒环境影响指标最低,与复合淀粉基、全纤维、覆膜纤维餐盒相比,GWP分别降低 23.73,36.61,52.19 kg;AP 分别降低 0.12,0.08,0.13 kg;EP 分别降低 0.04,0.15,0.2 kg;RI 分别降低 0.05,0.08,0.11 kg。全淀粉餐盒环境影响

表3 纤维素餐盒生命周期清单

Table 3 Life cycle list of fiber lunch box

项目	单位	全纤维材料	覆膜纤维基材料
单个质量	g	21.90	27.00
总质量	kg	21.90	27.00
原辅料			
聚乙烯	kg	0.00	2.10
木材	kg	6.09	6.09
草浆,蔗渣浆	kg	17.70	17.70
醇醚	kg	0.00	0.03
助留剂	kg	0.00	0.36
活性硅	kg	0.00	0.07
水	m ³	0.16	0.16
能源			
电能	MJ	167.83	198.47
排放			
挥发性有机物	g	0.03	0.05
SO _x	g	0.08	0.11
NO _x	g	0.11	0.37
颗粒物	g	0.07	0.07

风险相对较小,在环境影响上优于全纤维材料,这一点在陆地酸化、水磷酸化和大气污染上较显著。4种餐盒的环境影响评价如表4所示。

表4 4种一次性餐盒生命周期环境影响评价

Table 4 Environmental impact assessment for the life cycle of four disposable lunch boxes

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA 结果			
		全淀粉材料	复合淀粉基材料	全纤维材料	覆膜纤维基材料
GWP	kg CO ₂ eq.	25.71	49.44	62.32	77.90
PED	MJ	521.98	1 003.82	334.15	417.69
AP	kg SO ₂ eq.	0.12	0.24	0.20	0.25
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.	0.04	0.08	0.19	0.24
ODP	kg CFC-11 eq.	微量	微量	微量	微量
RI	kg PM _{2.5} eq.	0.03	0.08	0.11	0.14

2.3 碳足迹和能耗

4种餐盒的碳排放和能耗如图3所示。根据4种一次性餐盒的碳排放和能源消耗数据统计:淀粉餐盒的碳排放主要集中于“摇篮到门阶段”,纤维餐盒则在“门到门阶段”。全生命周期下,覆膜纤维餐盒累计排放 CO₂ 195.24 kg,全纤维餐盒 131.03 kg,复合淀粉基餐盒 98.84 kg,全淀粉塑料餐盒 39.91 kg。2种纤维餐盒的碳排放显著高于

淀粉餐盒则在“门到门阶段”。全生命周期下,覆膜纤维餐盒累计排放 CO₂ 195.24 kg,全纤维餐盒 131.03 kg,复合淀粉基餐盒 98.84 kg,全淀粉塑料餐盒 39.91 kg。2种纤维餐盒的碳排放显著高于

2种淀粉餐盒。“门到门”阶段,生产1000个复合淀粉基餐盒造成11 kg碳排放,覆膜纤维餐盒的加工释放85.44 kg CO₂,是等量纤维餐盒的8倍。“门到坟墓”阶段,全淀粉和全纤维餐盒满足堆肥条件,碳排放大大减少,与焚烧处理的不可降解餐

盒相比,碳排放分别减少72.1%,85.7%。能源消耗方面,全淀粉餐盒全生命周期累计能耗最低,仅为332.04 MJ。另外,使用全淀粉塑料替代全纤维餐盒可节能416.23 MJ。覆膜纸餐盒和复合淀粉基餐盒用于焚烧分别产生电能37.91 MJ和10.44 MJ。

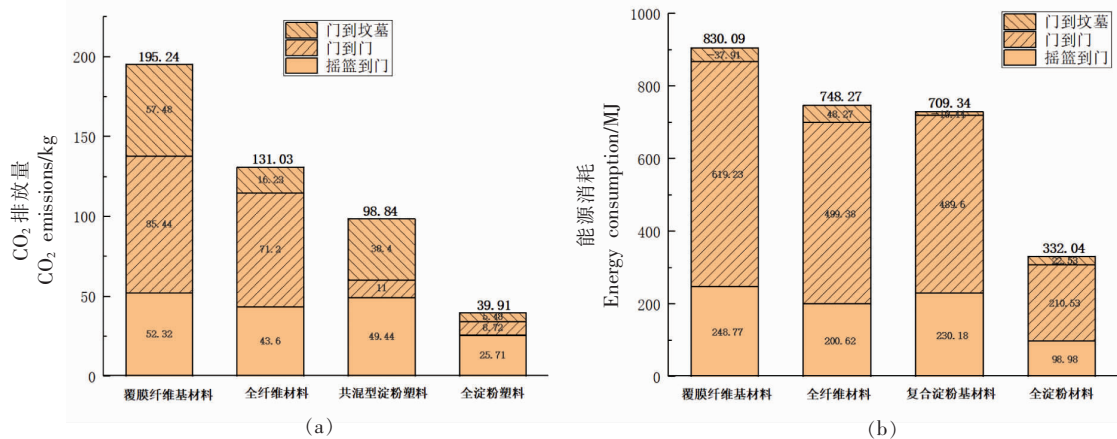


图3 4种一次性餐盒碳排放和能耗比较

Fig.3 Comparison of carbon emission and energy consumption of four types of disposable lunch boxes

3 结论

本文对热塑性淀粉、纸浆这两大类常见塑料餐具替代材料进行全生命周期评价,对1000个覆膜纤维材料、全纤维材料、复合淀粉基材料、全淀粉材料4种餐盒进行生命周期评价。结果显示,全淀粉塑料餐盒的环境影响指标、碳排放和能耗最低,与全纤维餐盒相比碳排放降低69.5%,节约416.23 MJ电能。相比于覆膜纤维材料,使用复合淀粉基材料能降低79.6%的碳排放,节约38.9 MJ电能。纸浆的加工过程会产生大量废水、废气,这由于其制浆、漂白等工艺过程所致,该过程还会产生大量有机氯和固体颗粒状悬浮物,废水处理过程会造成更大的环境负担。这说明纸替代并非为解决外卖垃圾问题的最佳对策。淀粉原料可再生,加工过程简单,加工过程较纤维(纸浆)耗能低,碳排放小。淀粉基材料作为一类绿色环保替代产品,为塑料污染治理提供了新思路,不仅在一次性外卖餐饮包装领域有很好的发展前景,而且满足了电商、茶饮、快递等新兴行业对环境友好型替代产品的需求,将有助于国家双碳目标和美丽中国建设。

参 考 文 献

- [1] 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 B, JIA X, ZHI Z H, et al. Process optimization and performance analysis of composite modified starch films[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 156-163.
- [2] 刘亚芳,王顺达,牟子平.两种一次性餐盒生命周期各阶段对环境的影响比较研究[J].黑龙江科技信息,2014,3(9):100-101.
LIU Y F, WANG S D, MOU Z P. Comparative study on the environmental impact of two disposable lunch boxes in each stage of their life cycle[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2014, 3(9): 100-101.
- [3] ZHOU Y, SHAN Y, GUAN D, et al. Sharing tableware reduces waste generation, emissions and water consumption in China's takeaway packaging waste dilemma[J]. Nature Food, 2020, 1(9): 552-561.
- [4] 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 Z Y, WANG Y, LI X X, et al. Research progress on starch-based biodegradable materials[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(5): 1-7.
- [5] Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework; ISO 14040:2006 [S]. UK: Standards Policy and Strategy Committee, 2006: 1-20.
- [6] FRANCIS J G, PERRY D M, FOURNIER F M, et al. Removal of organic deposits from recycled fibers used for producing paper: US20090120596 A1[P/OL]. 2009-5-14 [2021-12-7]. <https://patents.google.com/patent/US20090120596A1/en>
- [7] 罗紫倩. 基于生命周期评价法的外卖食品包装能耗研究[J]. 改革与战略, 2021, 37(1), 111-124.
- LUO Z Q. Research on energy consumption of take-away food packaging based on life cycle assessment method[J]. Reformation & Strategy, 2021, 37(1): 111-124.
- [8] KOROL J, BURCHART D, PICHLAK M. Expansion of environmental impact assessment for eco-efficiency evaluation of biocomposites for industrial application[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 144-152.
- [9] HARDING K G, DENNIS J S, BLOTTNITZ H V F, 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.
- [10] 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: 289-305.
- [11] ALMEIDA J, PELLECC M L, BENGTSSON J. Reusable coffee cups life cycle assessment and benchmark[J/OL]. (2018-07-13) [2021-08-10]. <https://www.researchgate.net/publication/328600555>
- [12] ROSS S, EVANS D, WEBBER M. Using LCA to examine greenhouse gas abatement policy[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(1): 19.
- [13] POTTING J, HARST E. Facility arrangements and the environmental performance of disposable and reusable cups[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(8): 1143-1154.
- [14] 王龙, 李颖. 北京市生活垃圾焚烧发电厂温室气体排放及影响因素[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6491-6498.
- WANG L, LI Y. Greenhouse gas (GHG) emission and its influencing factors in Beijing municipal solid waste incineration power plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(12): 6491-6498.
- [15] HU X, JIA X, ZHI Z, et al. Improving the properties of starch-based antimicrobial composite films using ZnO-chitosan nanoparticles[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 210: 204-209.
- [16] 翁云焯, 李字义, 刘万蝉, 等. 受控堆肥条件下材料需氧生物分解能力试验方法的研究[J]. 中国塑料, 2003, 17(9): 80-84.
- WENG Y X, LI Z Y, LIU W C, et al. Study on method of aerobic biodegradability and disintegration of plastic materials under controlled composting conditions[J]. China Plastics, 2003, 17(9): 80-84.
- [17] RAZZA F, FIESCHI M, INNOCENTI F, et al. Compostable cutlery and waste management: An LCA approach[J]. Waste Management, 2009, 29(4): 1424-1433.
- [18] MADIVAL S, AURAS R, SINGH S, 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.
- [19] FOTEINIS S. How small daily choices play a huge role in climate change: The disposable paper cup environmental bane[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 1-8.
- [20] POTTING J, HARST E. Facility arrangements and the environmental performance of disposable and reusable cups[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(8): 1143-1154.

Evaluation of Four Types of Green Tableware Derived from Starch and Cellulose Substitute Materials

Li Dexiang¹, Li Yukun¹, Ye Lei², Jin Zhengyu¹, Zhi Zhaohui², Miao Ming^{1,2*}

(¹State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

²Jiangsu Longjun Environmental Protection Industrial Development Co., LTD., Changzhou 213003, Jiangsu)

Abstract In order to compare from the environmental performance of starch and cellulose material, this thesis to popularize the use of the biological basis of takeout areas catering utensils (compound starch material coated fiber wiki) and biodegradable plastic tableware (total starch materials All fiber) as the research object, analysis of the product life cycle energy consumption and environmental emissions of various resources and evaluate its environmental impact Flow based on 1 000 take-out lunch box, environmental assessment software is used to establish the green environmental protection tableware of LCA in life cycle assessment model results show that the carbon emissions and energy consumption is the result of starch green boxes which focuses on raw material acquisition and the two stages of waste disposal, green boxes from the fiber carbon emissions and energy consumption is mainly in the products production stage The total starch degradable tableware has the lowest environmental impact index, in which the cumulative CO₂ release is 39.91 kg and the energy consumption is 332.04 MJ. Compared with the total fiber degradable meal box, the carbon emission is reduced by 69.5% and the energy saving is 416.23 MJ.

Keywords starch; cellulose; bio-based; biodegradable; life cycle assessment; tableware