

## 南荻生态包装箱的全生命周期评价比较研究

廖倩滢<sup>1a,2</sup>, 张珺<sup>1a</sup>, 易自力<sup>1b</sup>, 李有志<sup>1c</sup>

(1.湖南农业大学 a.商学院 b.生命科学学院 c.资源与环境学院,长沙 410128;  
2.邵阳学院 法商学院,湖南 邵阳 422000)

**摘要:** **目的** 对南荻生态包装箱和传统木质胶合板包装箱的全生命周期进行环境影响比较分析,探索前者对后者的生态替代性。**方法** 文中基于生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA),使用 ReCiPe 2016 方法对 2 种包装箱的 18 种环境影响类型展开全生命周期的 LCA 研究。**结果** 南荻生态包装箱全生命周期环境影响单一分值为 3.08 Pt, 包装箱生产、运输和废弃物处置阶段占比分别为 68%、8%、24%; 传统木质胶合板包装箱全生命周期环境影响单一分值为 3.61 Pt, 包装箱生产、运输和废弃物处置阶段占比分别为 75%、6%、19%; 前者较之后者每功能单位减少 14.7% 的环境影响。**结论** 结果表明南荻生态包装箱整体环境表现优于传统木质胶合板包装箱,南荻刨花板用量的减少带来的环境效益最大,循环利用包装箱及其生物质,以及改进包装箱尺寸设计也是减少化石资源消耗的可能途径。在洞庭湖造纸业全面退出情境下,研究为决策者在技术和环境层面选择南荻的利用方式提供了依据。

**关键词:** 南荻; 包装箱; 生命周期评价

**中图分类号:** TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)19-0120-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.19.013

## Comparative LCA Study on the *Miscanthus lutarioriparius*-based Packaging Box

LIAO Qian-ying<sup>1a,2</sup>, ZHANG Jun<sup>1a</sup>, YI Zi-li<sup>1b</sup>, LI You-zhi<sup>1c</sup>

(1. a. School of Business b. College of Life Science c. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. School of Law and Business, Shaoyang University, Hunan Shaoyang 422000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compare and analyze the environmental impact of the *Miscanthus lutarioriparius*-based packaging box and the wooden plywood packaging box in their whole life cycles and explore the ecological sustainability of the former to the latter. ReCiPe 2016 Midpoint (H) and ReCiPe 2016 Endpoint (H) were employed in 18 environmental impact categories based on life cycle assessment (LCA). The single score of environmental impact in the whole life cycle of *Miscanthus lutarioriparius*-based packaging boxes was 3.08 Pt, and the production, transportation and waste disposal stages of which accounted for 68%, 8% and 24%, respectively. The single score of that of traditional wooden plywood packaging boxes was 3.61 Pt, and the production, transportation and waste disposal stages of which accounted for 75%, 6% and 19%, respectively. Compared with the latter, the environmental impact of the former was reduced by 14.7% per functional unit. The results show that the overall performance of the *Miscanthus lutarioriparius*-based packaging box is better than that of the traditional wooden plywood packaging box. It is found that the reduction of the consumption of *Miscanthus lutarioriparius*-based particleboard could bring the greatest environmental benefit. The cyclic utilization of the boxes and the separated biomass and the improvement of the design of packaging boxes are also ways to reduce the

收稿日期: 2021-12-31

基金项目: 湖南省科技厅农业领域重点研发项目(2019NK2011)

作者简介: 廖倩滢(1987—),女,博士,讲师,主要研究方向生态经济与管理。

consumption of fossil resources. In the context of the withdrawal of the paper industry around Lake Dongting, this study provides technological and environmental evidence for decision makers to choose the way of utilization of *Miscanthus lutarioriparius*.

**KEY WORDS:** *Miscanthus lutarioriparius*; packaging box; life cycle assessment

近年来各类包装物引起的环境问题日益受到关注<sup>[1]</sup>, 其中木质包装箱多为一次性使用, 造成了森林资源浪费<sup>[2]</sup>。南荻(*Miscanthus lutarioriparius*)具有“一年一收”的特性, 曾经是湖南省造纸业主要原材料<sup>[3]</sup>, 但 2018—2019 年湖南省清退洞庭湖区全部制浆造纸企业, 导致大量南荻弃收, 不仅造成了资源浪费、莘农失业等社会经济问题, 同时大量南荻生物质在水中腐解会造成新的环境问题。用南荻生物质代替木材生产包装箱, 可以同时解决上述问题。

目前包装箱环境影响的相关研究主要集中在瓦楞纸箱和木质包装箱: 有学者先后对瓦楞纸箱开展了生命周期评价研究, 认为提升产品的循环使用率是减轻环境负担的有效途径<sup>[4, 5]</sup>。也有学者对比了钢边箱和传统木箱的环境影响, 但结果表明差异不大<sup>[2]</sup>。更多的学者是对包装箱所用板材进行研究, 如对胶合板<sup>[6]</sup>、定向刨花板<sup>[7-8]</sup>、纤维板<sup>[9]</sup>等的生命周期评价。现有对包装箱生命周期环境影响的研究或仅考虑设计的改进, 或仅把生产阶段纳入系统边界而非全生命周期, 或仅选择了少数几个影响类型进行分析。因此文中的研究对象选择了在基材和设计上均有改良的南荻生态包装箱, 拟采用生命周期评价方法探讨其“从摇篮到坟墓”的全生命周期环境影响(包含 18 种影响类型), 并开展与传统胶合板包装箱的比较研究。

## 1 研究方法

### 1.1 LCA 概述

LCA 目前已成为国际上环境管理和产品设计的重要工具之一<sup>[10]</sup>。国际上开展 LCA 的长期研究的组织主要有国际环境毒理学和化学学会(SETAC)、国际标准化组织(ISO)等<sup>[11]</sup>, 目前的 LCA 研究多在 ISO TC 207 的框架下开展<sup>[12]</sup>。我国关于 LCA 的研究始于 20 世纪 90 年代<sup>[13]</sup>, 近年来 LCA 在产品绿色设计和产业环境影响评价的实践一直在国内开展, 并日渐得到企业和政府相关部门重视。

LCA 模型主要分类: 基于工艺流程图的生命周期清单分析, 矩阵生产系统, 基于投入产出的生命周期清单分析, 混合 LCA<sup>[14]</sup>。第 1 种是最基本且最常用的, ISO 标准使用该模型进行描述<sup>[15]</sup>。第 2 种是由 Heijungs<sup>[16]</sup>提出, 引入逆矩阵法简化了 LCI 数据的表达和计算。第 3 种模型使用投入产出表(Economic input-Output, EIO), 有效避免了截断误差<sup>[17]</sup>。第 4 种模型连接了第 1 种和第 3 种模型并吸取两者优点的方法。由于我国的投入

产出表滞后期长, 且 LCA 背景数据库保持即时更新, 在 LCA 比较研究中采用基于工艺流程图的基本模型仍然是有效且科学的主流路径, 故文中研究使用 ISO 描述的基本模型进行包装箱的全生命周期环境影响评价。

### 1.2 目标及范围

#### 1.2.1 研究对象

南荻生态包装箱(见图 1 和图 2)主材采用南荻定向刨花板, 采用淀粉胶(非专利技术)为黏结剂, 零甲醛排放。结构设计依据板材的高剪切强度特性, 在侧板本体加入榫头, 组装时无需其他扣件便可形成箱体, 且侧板结合方式为漩涡插合结构, 整体性高。流水线为全自动化生产模式, 加工成本约为同规格传统木箱 1/3。南荻生态包装箱具有便拆装、可复用的优点, “以草代木”响应碳中和目标。



图 1 南荻生态包装箱组装后外观  
Fig.1 Assembled *Miscanthus lutarioriparius*-based packaging box



图 2 南荻生态包装箱拆装后外观  
Fig.2 Disassembled *Miscanthus lutarioriparius*-based packaging box

#### 1.2.2 功能单位

研究所选功能单位为外尺寸为 1 228 mm × 888 mm × 1 154 mm 的南荻生态包装箱, 板材厚度为 15 mm, 平均

密度为 650 kg/m<sup>3</sup>。参照对象为同尺寸厚度的木质胶合板包装箱，平均密度为 600 kg/m<sup>3</sup>。

### 1.3 系统边界

研究采用归因 LCA 方法，系统的边界由农林业(摇篮)开始，到废弃物处置(坟墓)结束(见图 3—4)。产品的全生命周期一般包括 5 个阶段：原材料生产、产品生产、储运、使用与维护、废弃和再利用过程<sup>[18]</sup>。为了与 Ecoinvent 中胶合板保持研究范围一致，南荻生长过程中固定的 CO<sub>2</sub>、N、P 等也包含在系统边界内，清单数据依据文献<sup>[19]</sup>计算得出。包装箱的使用和维护阶段合并到运输过程中。由于传统木包装箱大多一次性使用，为了便于比较，故未考虑循环利用。资本资产以及人类活动均不包括在系统边界内<sup>[9]</sup>。

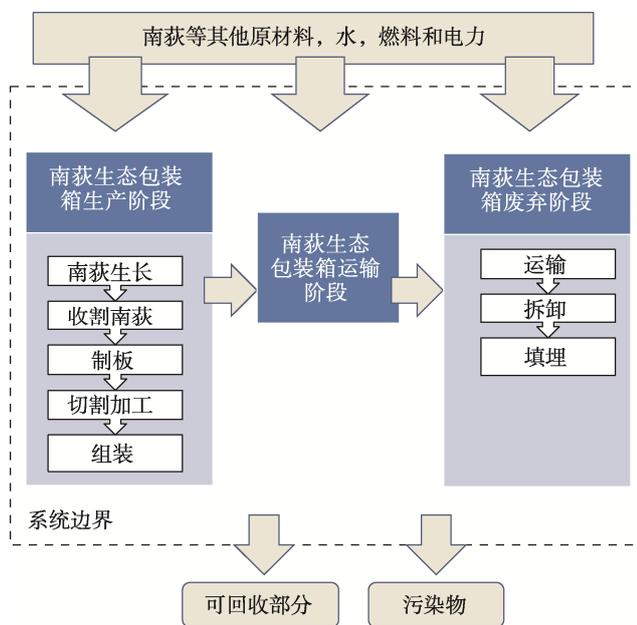


图3 南荻生态包装箱全生命周期系统边界  
Fig.3 System boundary of the whole life cycle of Miscanthus lutarioriparius-based packaging box

### 1.4 数据来源及假设

南荻生态包装箱的各阶段清单数据来源于第三方机构的现场测量数据、企业内部生产文件和文献<sup>[2,19]</sup>，材料运输阶段的清单数据来源于文献<sup>[20]</sup>。我国当前集中处理垃圾一般采取填埋，故本研究假设包装箱废弃后填埋处理，该阶段清单数据参考文献<sup>[21]</sup>。胶合板生产清单和其他背景数据来自 ELCD、Ecoinvent 等数据库。清单数据见表 1。

运输阶段油耗的计算基于以下假设：研究所选货车规格为 9 600 mm×2 300 mm×2 300 mm，运输距离为 2 109 km，每辆货车每次装载 17 个包装件，货物质量 210 kg<sup>[2]</sup>。2 种包装箱的质量依据清单数据和密

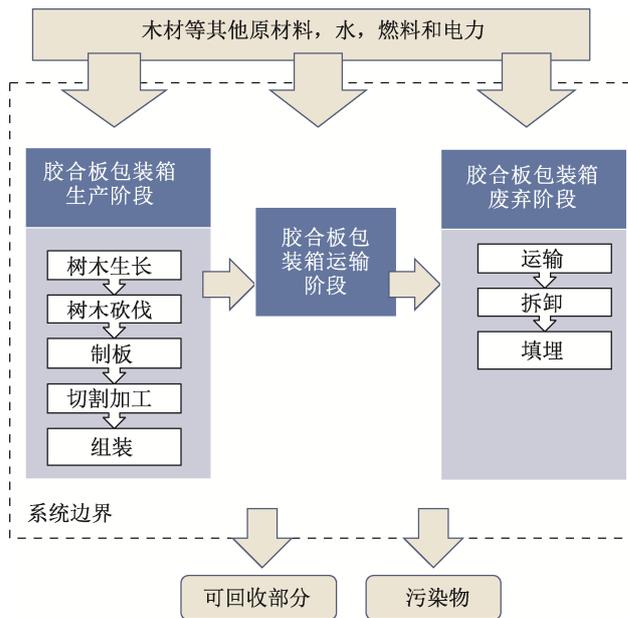


图4 胶合板包装箱全生命周期系统边界  
Fig.4 System boundary of the whole life cycle of wooden plywood packaging box

度计算得出，分别为 69.48 kg 和 65.59 kg。依据文献<sup>[22]</sup>，在运输阶段选择一种货车在满载时每 100 km 消耗柴油 20 L，在空车时油耗为满载时的 2/3，货车最大载质量为 18 t。货车在实际运输过程中的柴油消耗总量计算公式<sup>[23]</sup>为：

$$Q = d \times q \times \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \times \eta + \frac{2}{3} \times \xi \right)$$

式中：Q 为油耗量；d 为运输距离；q 为单位距离满载油耗量；η 为装载率；ξ 为返空率。

## 2 结果

现有板材 LCA 研究多采用 CML 和 ReCiPe<sup>[24]</sup>，前者适用于欧洲，后者适用于全球<sup>[25]</sup>。此外 ReCiPe 在中点和终点水平上提供了一致的表征因子，通过 ReCiPe 终点方法可以获得单一指标分值，使不同方案的结果更具可比性。故本研究选择采用研究 LCA 最常用的软件 SimaPro 9.0<sup>[26]</sup>，选择 ReCiPe 2016 Midpoint (H) 及 ReCiPe 2016 Endpoint (H) 2 种方法开展研究。在本节使用的中点方法，共有 18 种环境影响类型：全球变暖 (Global Warming, GW)、平流层臭氧耗损 (Stratospheric Ozone Depletion, SOD)、电离辐射 (Ionizing Radiation, IR)、臭氧形成——人类健康 (Ozone Formation, Human Health; OFHH)、细颗粒物形成 (Fine Particulate Matter Formation, FPMF)、臭氧形成——陆地生态系统 (Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems; OFTE)、陆地酸化 (Terrestrial Acidification, TA)、淡水富营

表 1 2 种包装箱的生命周期清单  
Tab.1 Life cycles of two packaging boxes

阶段	投入品	南荻生态包装箱	传统木质包装箱
生产阶段	南荻生态刨花板	0.106 51 m <sup>3</sup>	—
	电力	1.1 kw·h	1.3 kw·h
	胶合板	—	0.105 97 m <sup>3</sup>
	铁钉	—	1.766 kg
运输阶段	柴油	7.453 kg	7.129 kg
	柴油	0.240 kg	0.226 kg
	电力	0.136 kw·h	0.328 kw·h
	CO	0.0034 kg	0.003 kg
	CO <sub>2</sub>	2.536 kg	2.319 kg
	CH <sub>4</sub>	1.063 kg	0.972 kg
	NOX	0.004 877 kg	0.004 46 kg
	SO <sub>2</sub>	0.001 396 kg	0.001 277 kg
	H <sub>2</sub> S	0.020 50 kg	0.018 74 kg
	NH <sub>3</sub>	0.012 3 kg	0.011 24 kg
	HCl	4.84×10 <sup>-6</sup> kg	4.42×10 <sup>-6</sup> kg
	COD	0.004 509 kg	0.004 123 kg

养化 (Freshwater Eutrophication, FEU)、海洋富营养化 (Marine Eutrophication, MEU)、陆地生态毒性 (Terrestrial Ecotoxicity, TE)、淡水生态毒性 (Freshwater Ecotoxicity, FEC)、海洋生态毒性 (Marine Ecotoxicity, MEC)、人类致癌毒性 (Human Carcinogenic Toxicity, HCT)、人类非致癌毒性 (Human Non-Carcinogenic Toxicity, HNT)、土地使用 (Land Use, LU)、矿产资源稀缺性 (Mineral Resource Scarcity, MRS)、化石资源稀缺性 (Fossil Resource scarcity, FRS)、水消耗 (Water Consumption, WC)。

### 2.1 南荻生态包装箱 LCA 结果解释

图 5 显示, 包装箱生产阶段的环境影响在全部环境影响类型中均占比最大 (53%~102%)。该阶段在淡水富营养化中比例超过 100%, 是因为南荻生物质生长从水体中吸收了 N、P 进而产生负的环境负荷, 而生产阶段的 N、P 排放量低, 使得整个生命周期的 FEU 为负数。运输阶段在 GW 外的其他影响类型中占比第二, 其中占比最高的为 FRS(45%), 源于柴油消耗。废弃物处置的环境影响整体较低, 但在 GW 和 TA 方面作用显著 (41%和 9%), 这说明虽然该阶段使用了 HDPE 等材料防止渗滤液的渗漏<sup>[22]</sup>, 但依然对空气和土壤产生了环境负担。

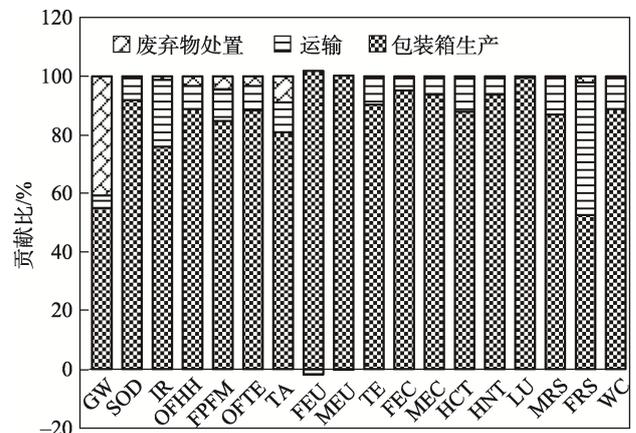


图 5 ReCiPe 2016 Midpoint (H)下南荻生态包装箱生命周期各阶段环境影响贡献比

Fig.5 Distribution of environmental impact between contributing stages of the Miscanthus lutarioriparius-based packaging box in ReCiPe 2016 Midpoint (H)

### 2.2 传统胶合板包装箱 LCA 结果解释

与 2.1 类似, 胶合板包装箱生产在大多数影响类型中均占主导地位 (51%~100%) (见图 6)。除了胶合板生产在多数影响类型中超过 50%贡献比, 该阶段使用的铁钉在 HCT 和 FRS 2 个方面贡献比分别高达

69%和52%。与2.1中不同的是,胶合板包装箱生产对GW的贡献占比低于废弃物处置阶段,这种差异主要由于胶合板施胶量小于刨花板以及对原材料的处理方式不同等<sup>[27]</sup>。运输阶段在除GW以外的其他类型中占比居中,其中化石资源稀缺高达47%;平流层臭氧耗竭占比20%,主要由于柴油生产中排放的甲烷和卤化烃等。废弃物处置的环境影响整体较低,但在GW和TA方面依然显著(占比分别为49%和14%)。南荻生态包装箱采用榫卯结构,在废弃阶段可手动拆卸,而胶合板包装箱由于使用了铁钉组装,需要使用机械分拆,消耗电力是该阶段对TA贡献比提升的主要原因。

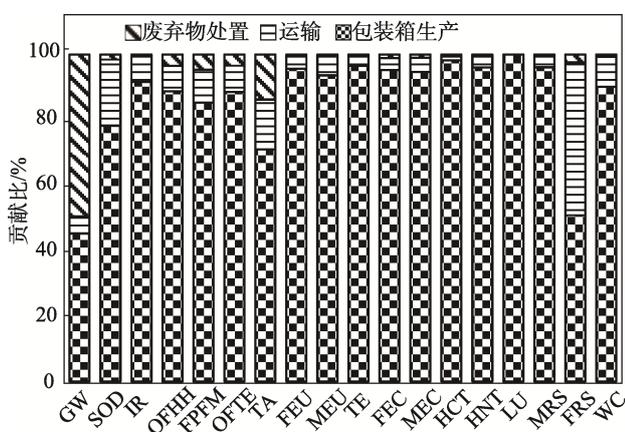


图6 ReCiPe 2016 Midpoint (H)下胶合板包装箱生命周期各阶段环境影响贡献比  
Fig.6 Distribution of environmental impact between contributing stages of the wooden plywood packaging box in ReCiPe 2016 Midpoint (H)

### 3 讨论

#### 3.1 基于 ReCiPe 2016 Midpoint (H)的比较 LCA

标准化的中点比较结果见图7,两者在FEU、TE、FEC、MEC、HCT、HNT等6个影响类型存在显著差异。由于南荻生长过程中对水体中N、P的净化作用,南荻生态包装箱在FEU和MEU2个影响类型均表现为负值。南荻生态包装箱在TE、FEC、MEC、HNT的标准化值分别为胶合板包装箱的36%、90%、81%、63%。值得注意的是HCT方面,前者仅为后者的15%,这归因于前者使用了淀粉基黏结剂替代石油黏结剂。与上述影响类型相比,两者在其他影响类型中的标准化值均较低且绝对值差异不大。

虽然两种产品的GW标准化值均小于0.02,由于碳中和是研究热点,故仍将GW作为热点。南荻生态包装箱的全球变暖标准化值是胶合板包装箱的1.3倍,可能的原因有:同尺寸的包装箱,前者密度更大,

废弃物处置阶段是以质量为基础计算排放和消耗,且3.1表明废弃物处置阶段对全球变暖的贡献比高达41%;2种包装箱基材生产工艺不同,前者使用的刨花板对电力和热能消耗更大;此外,由于前者每功能单位的重量更大,在装载数相同的情况下,装载率越高,油耗越大。

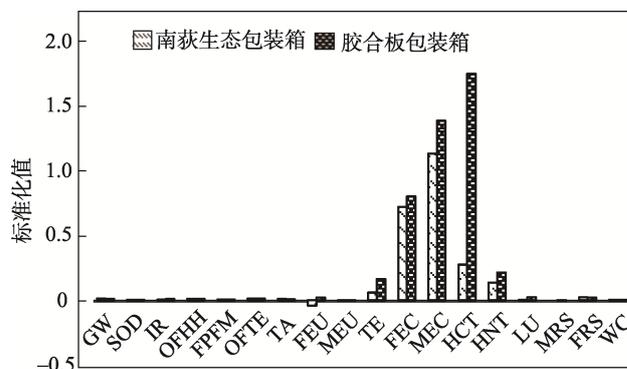


图7 ReCiPe 2016 Midpoint (H)下2种包装箱的环境影响比较  
Fig.7 Comparative environmental profiles in ReCiPe 2016 Mid-point(H) of two packaging boxes

#### 3.2 基于 ReCiPe 2016 Endpoint (H)的比较 LCA

ReCiPe 2016 Endpoint (H)方法共有3种环境影响类型,分别为人类健康(Human health)、生态系统(Ecosystems)、资源(Resources),该方法基于中点方法的数据进行加权(使用ReCiPe内置权重),得到单一分值(用Pt表示)。图8表明,两者在人类健康方面的差异较小(约1%),主要由于板材生产工艺不同:南荻施胶量较大,虽然黏结剂本身无毒性,但淀粉胶原料的生产过程中会排放相关毒性物质(如丁醇、表氯醇等);而胶合板使用的石油黏结剂会挥发甲醛,损害人体健康,因此加权后两者的分值均较高。南荻生态包装箱在生态系统方面明显优于胶合板包装箱,仅为后者的30%,原因在于前者使用的南荻为多年生、一年一收,持续利用并不会对生态系统造成负担,且对种群发展有利;后者使用多年生木材,砍伐树木会造成森林生态系统退化。在资源消耗方面,两者差异非常小(约0.1%),这是由于两方面的影响互相抵消导致:如3.1所述,南荻生态包装箱每功能单位在运输阶段油耗略大于胶合板;胶合板组装需要使用铁钉,而南荻生态包装箱由于榫卯结构无需另外消耗矿物资源。最终将3个类型的分值加总,得出南荻生态包装箱和胶合板包装箱的单一分值分别为3.08 Pt和3.61 Pt(详见图9),前者较之后者每功能单位减少14.7%的环境影响。经市场调查和实地考察,前者每功能单位价格为后者的86%,因此南荻生态包装箱是传统木质胶合板包装箱的一种兼具生态和经济效益的替代品。

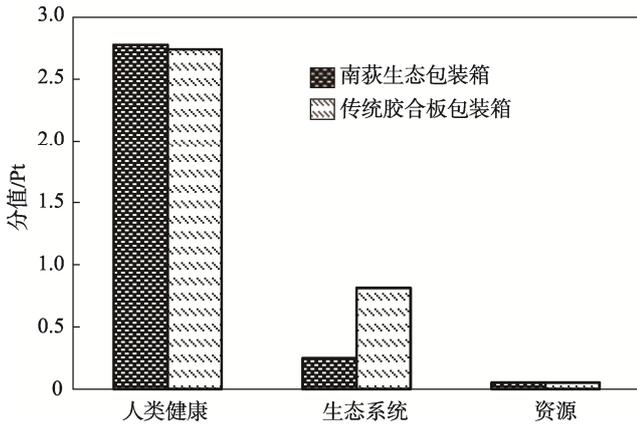


图 8 基于 ReCiPe 2016 Endpoint (H) 的 2 种包装箱单一分值比较

Fig.8 Comparative single score profiles in ReCiPe 2016 Endpoint (H) of two packaging boxes

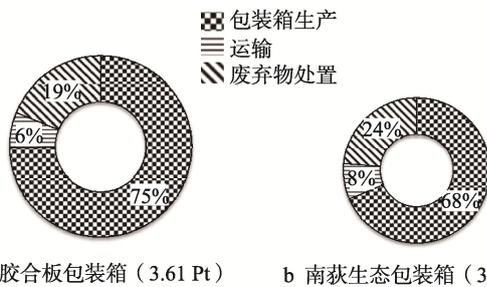


图 9 ReCiPe 2016 Endpoint (H) 下 2 种包装箱的各阶段贡献比较

Fig.9 Comparative contribution profiles in ReCiPe 2016 Endpoint (H) of two packaging boxes

### 3.3 敏感性分析及改进建议

文献[19]已经开展了南荻生态板生产的敏感性分析, 环境影响热点为制胶阶段和生物质颗粒燃烧阶段, 因此文中敏感性分析不再考虑板材生产的细分工序。

为探索减少环境负担的改进潜力, 文中采用 ReCiPe 2016 Midpoint (H) 进行南荻生态包装箱的敏感性分析。图 10 显示了 3 种可能情景下的敏感性分析结果, S1 为减少 10% 板材消耗量; S2 为减少 10% 废弃物填埋; S3 为减少 10% 运输油耗。总体上, 减少板材的使用量是降低环境负担最有效的途径, 特别是在 MEU、FEU、LU 能达到 10% 左右的减幅。降低板材环境影响的可能途径有两个: 一是通过减少施胶量来降低板材的整体环境影响; 二是减少板材总体用量, 在保障力学性能的基础上降低耗材量。S2 中变化最明显的是 GW (4%), 这说明垃圾填埋处理产生的温室效应气体较多, 优化途径有: 增加包装箱的循环利用率 and 利用次数。实地调研发现, 未对包装箱循环利用的主要原因是仓储成本高, 而南荻生态包装箱可手工拆解, 只需少量仓储空间,

因此可以提高循环利用率; 生物质回收利用, 如作为有机肥料或者生物质燃料的原料。虽然生物质回收利用时也有温室气体排出, 但考虑到对石油产品的替代效应和产品间的环境影响分摊, 也能降低该阶段的环境影响。S3 表明运输阶段油耗的 10% 减少将降低 5% 的 FRS。可以通过调整箱体尺寸设计可以增加单辆货车的装载个数, 从而降低运输阶段功能单位的平均油耗<sup>[2]</sup>。

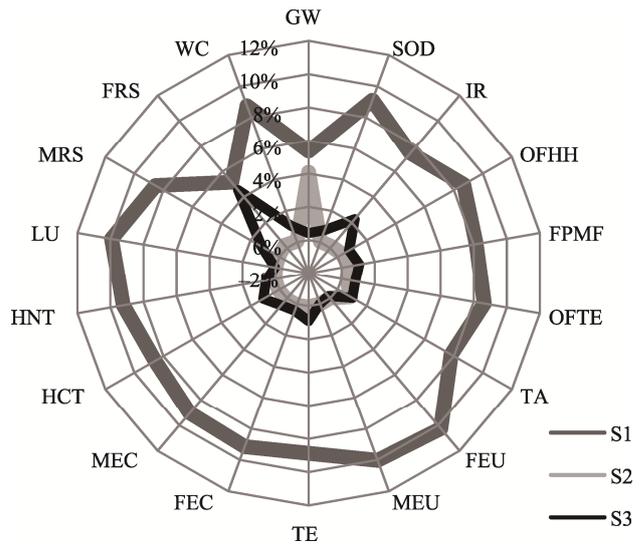


图 10 南荻生态包装箱敏感性分析  
Fig.10 Sensitivity analysis over the global profiles of the *Miscanthus lutarioriparius*-based packaging box

## 4 结语

文中对南荻生态包装箱和木质胶合板包装箱进行了全生命周期 LCA 比较研究, 系统边界包含包装箱生产、运输和废弃 3 个阶段, 采用中点和终点两种方法对 18 个影响类型的潜在环境影响进行了评估。采用中点法分析发现, 南荻生态包装箱在 FEU、TE、FEC、MEC、HCT、HNT 等 6 个影响类型, 较之木质胶合板包装箱存在显著优势。在终点法中, 南荻生态包装箱较之胶合板包装箱的环境影响单一分值减少 14.7%, 且市场价格较后者降低 14%, 因此南荻生态包装箱是木质胶合板包装箱的一种兼具生态和经济效益的替代品。最后采用中点法确定生改善南荻生态包装箱环境绩效的优先次序, 发现最具改进潜力的阶段为包装箱生产, 该阶段刨花板用量减少带来的环境效益最大。此外循环利用包装箱及其生物质、改进包装箱尺寸设计也是降低 GW 和 FRS 的可能途径。

下一步研究可以对南荻生态包装箱进行结构和成分的优化设计、循环利用模式进行探究、使用 LCA 评价改进后的环境效益分析。此外可以拓展到其他板材生产的包装箱, 如高密度纤维板等。

## 参考文献:

- [1] 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.  
WANG Xin-ting, FANG Fang, ZHU Ren-gao, et al. Life Cycle of Assessment of Packaging Products[J]. Green Packaging, 2019(8): 51-54.
- [2] 巩桂芬, 李想. 两款木包装箱的生命周期影响分析及对比[J]. 包装工程, 2021, 42(5): 134-141.  
GONG Gui-fen, LI Xiang. Impact Analysis and Comparison of Two Wooden Packaging Boxes during Life Cycle[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(5): 134-141.
- [3] YANG S, XUE S, KANG W, et al. Genetic Diversity and Population Structure of *Miscanthus Lutarioriparius*, an Endemic Plant of China[J]. PLoS One, 2019, 14(2): 0211471.
- [4] 刘继永, 杨前进, 韩新民. 瓦楞纸箱全生命周期环境影响评价研究[J]. 环境科学研究, 2008(6): 105-109.  
LIU Ji-yong, YANG Qian-jin, HAN Xin-min. Life Cycle Assessment of Environmental Impact of Corrugated Boxes[J]. Research of Environmental Sciences, 2008(6): 105-109.
- [5] 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.  
WANG Jing-yao, WU Jin-zhuo, LONG Zhan-lu. Environmental Impact Assessment on Different Life Cycle Stages of Style 0201 Corrugated Cases[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 96-102.
- [6] 王军会, 杨秦丹. 胶合板产品生命周期(LCA)评价分析[J]. 陕西林业科技, 2019, 47(5): 72-75.  
WANG Jun-hui, YANG Qin-dan. Analysis of Life Cycle Assessment for Plywood[J]. Shanxi Forest Science and Technology, 2019, 47(5): 72-75.
- [7] 张方文, 张亚慧, 于文吉. 基于生命周期评价的 OSB 生产环境影响分析[J]. 木材工业, 2017, 31(5): 22-26.  
ZHANG Fang-wen, ZHANG Ya-hui, YU Wen-ji. Environmental Impacts of Oriented Strand Board Based on Life Cycle Assessment[J]. China Wood Industry, 2017, 31(5): 22-26.
- [8] SILVA D A L, LAHR F A R, PAVAN A L R, et al. Do Wood-Based Panels Made with Agro-Industrial Residues Provide Environmentally Benign Alternatives? an LCA Case Study of Sugarcane Bagasse Addition to Particle Board Manufacturing[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(10): 1767-1778.
- [9] RIVELA B, MOREIRA M T, FEIJOO G. Life Cycle Inventory of Medium Density Fibreboard[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(3): 143-150.
- [10] 苏舒. 基于 DLCA 的住宅建筑环境影响评价模型及方法[D]. 北京: 清华大学, 2018: 6-7.  
SU Shu. Model and Method of Environmental Impact Assessment of Residential Buildings Based on DLCA[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018: 6-7.
- [11] 孙启宏, 万年青, 范与华. 国外生命周期评价(LCA)研究综述[J]. 世界标准化与质量管理, 2000(12): 24-25.  
SUN Qi-hong, WAN Nian-qing, FAN Yu-hua. Review of Life Cycle Assessment (LCA) Research Abroad[J]. World Standardization and Quality Management, 2000(12): 24-25.
- [12] 付允, 林翎, 陈健华, 等. 产品生命周期环境友好性评价方法研究[J]. 标准科学, 2014(7): 13-17.  
FU Yun, LIN Ling, CHEN Jian-hua, et al. Assessment Method for Environment-Friendly Products Based on Whole Life Cycle[J]. Standard Science, 2014(7): 13-17.
- [13] 席德立, 彭小燕. LCA 中清单分析数据的获得[J]. 环境科学, 1997(5): 84-87.  
XI De-li, PENG Xiao-yan. Data Acquisition for Inventory Analysis in LCA[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1997(5): 84-87.
- [14] SANGWON S, KUN M L, SANGSUN H. Eco-Efficiency for Pollution Prevention in Small to Medium-Sized Enterprises: A Case from South Korea. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4):223-240.
- [15] HANS-JURGEN K. The Revision of ISO Standards 14040-3-ISO 14040: Environmental management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2005, 10(3): 165.
- [16] REINOUT H. A Generic Method for the Identification of Options for Cleaner Products[J]. Ecological Economics, 1994, 10(1): 69-81.
- [17] 许红周, 计军平. 基于 EIO-LCA 模型的中国 1992—2012 年碳排放结构特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 727-737.  
XU Hong-zhou, JI Jun-ping. Carbon Emissions by Chinese Economy in 1992-2012: An Assessment Based on EIO-LCA Model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(4): 727-737.
- [18] KIA S, SHAHHOSSEINI V, SEBT M H, et al. Reliability-Based Life Cycle Assessment of the Concrete Slab in Bridges[J]. Civil and Environmental Engineering, 2020, 16(1): 170-183.
- [19] LIAO Qian-ying, ZHANG Jun, YI Zi-li, et al. Do *Miscanthus Lutarioriparius*-Based Oriented Strand Boards Provide Environmentally Benign Alternatives? An LCA Case Study of Lake Dongting District in China. Sustainability 2021, 23(13): 12976.
- [20] 杨洁, 王洪涛. 国内主要交通运输方式的生命周期对

- 比分析[C]// 第六届全国循环经济与生态工业学术研讨会, 陕西, 2021.
- YANG Jie, WANG Hong-tao. Comparative Analysis on the Life Cycle of Major Domestic Transportation Modes[C]// In Proceedings of the 6th National Symposium on Circular Economy and Ecological Industry, Shangxi City, China, 12 August 2011.
- [21] 雷永佳, 姚景, 赵飞, 等. 成都市生活垃圾两种处理方式的生命周期环境影响评价[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(4): 75-79.
- LEI Yong-jia, YAO Jing, ZHAO Fei, et al. LCA Environmental Impact Assessment of Two Treatment Methods of Household Garbage in Chengdu City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(4): 75-79.
- [22] BELL E M, HORVATH A. Modeling the Carbon Footprint of Fresh Produce: Effects of Transportation, Localness, and Seasonality on US Orange Markets[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(3): 1-11.
- [23] 薛拥军, 王珺. 板式家具产品的生命周期评价[J]. 木材工业, 2009, 23(4): 22-25.
- XUE Yong-jun, WANG Jun. Life Cycle Assessment of Panel Furniture Made from Medium Density Fiberboard[J]. China Wood Industry, 2009, 23(4): 22-25.
- [24] HUIJBREGTS M A J, STEINMANN Z J N, ELSHOUT P M F, et al. ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level Int J Life Cycle Assess, 2017, 22: 138-147.
- [25] ARIAS A, GONZÁLEZ-GARCÍA S, GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ S, et al. Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Bio-Adhesives for the Wood Panel Industry. a Comparison with Petrochemical Alternatives[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 738: 140357.
- [26] MOUSAZADEH H, KEYHANI A, MOBLI H et al. Environmental Assessment of RAMses Multipurpose Electric Vehicle Compared to a Conventional Combustion Engine Vehicle J Clean Prod, 2009, 17: 781-790.
- [27] JIA L, CHU J, MA L, et al. Life Cycle Assessment of Plywood Manufacturing Process in China[J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(11): 2037.

责任编辑: 曾钰婵