

基于环境绩效的烟草商业物流可降解薄膜包装优化研究

韩笑¹, 李荣国², 黄山², 杨莉^{3*}, 李洁³, 靳晓曼³, 姜晓雪³

(1. 陕西省烟草专卖局, 西安 710061; 2. 陕西省烟草局西安市公司, 西安 710199;

3. 长安大学 水利与环境学院, 西安 710064)

摘要: **目的** 在兼顾环境影响和经济效益的基础上, 运用科学的分析手段为烟草商业物流可降解薄膜优选及包装工艺升级提供决策参考。**方法** 本文从可降解薄膜的力学性能及其包装方式入手, 以生命周期评价法所确定的可降解薄膜环境影响潜值和相关经济指标作为基础数据, 运用基于松弛测度的非径向、非角度的数据包络分析模型 (SBM-DEA) 开展烟草商业物流可降解薄膜包装的环境绩效评价及冗余度分析。**结果** 根据 8 种可降解薄膜的力学性能确定了 3 种包装方式, 不同包装薄膜的生命周期环境影响潜能总值从大到小依次为 C、D、E、LDPE、A、B、G、F、H。根据环境绩效测算所确定的可降解薄膜包装优选方案为 A+缠绕包装 I 和 G+缠绕包装 I。**结论** 生命周期环境影响评价有助于全面分析可降解薄膜的环境友好性, 可降解薄膜的缠绕包装具有突出的环境绩效优势, 工艺升级和包装效率改进是提升烟草商业物流可降解薄膜包装环境绩效的入手点。

关键词: 烟草商业物流; 可降解薄膜; 环境影响; 生命周期法; 环境绩效

中图分类号: TB489

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)03-0276-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.032

Optimization of Degradable Film Packaging for Tobacco Commercial Logistics Based on Environmental Performance

HAN Xiao¹, LI Rongguo², HUANG Shan², YANG Li^{3*}, LI Jie³,
JIN Xiaoman³, JIANG Xiaoxue³

(1. China Tobacco Shaanxi Industrial Co., Ltd., Xi'an 710061, China; 2. Xi'an Company, China Tobacco Shaanxi Industrial Co., Ltd., Xi'an 710199, China; 3. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

ABSTRACT: The work aims to employ scientific analysis methods to provide decision-making reference for degradable films selection and packaging process upgradation in tobacco commercial logistics with consideration to environmental impact and economic benefits. Based on the matching of film mechanical properties and packaging ways, the environmental performance measurement and redundancy analysis of degradable film packaging were carried out with a non-radial and non-angular SBM-DEA model based on relaxation measurement, using the environmental impact potential via life cycle inventory and related economic indicators as basic data. The results indicated that three packing manners were determined for eight kinds of degradable films according to mechanical properties. The total environmental impact potential of different packaging films followed a descending order of C, D, E, LDPE, A, B, G, F and H. In addition, the wrapping packaging I of film A and wrapping packaging I of film G were preferable with effective environmental

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 陕西省烟草公司 2021 年度揭榜挂帅科技项目 (KJ-2021-10); 中国烟草总公司 2022 年度科技项目 (110202202035)

*通信作者

performance. It is concluded that life cycle environmental impact assessment contributes to a comprehensive analysis of the environmental friendliness of degradable films. Wrapping packaging of degradable films has outstanding environmental performance advantages. The upgrading of packing technology and the enhancement of packaging efficiency are the starting points to improve environmental performance of degradable film packaging.

KEY WORDS: tobacco commercial logistics; degradable film; environmental impact; life cycle assessment (LCA); environmental performance

烟草商业物流是烟草物流中心根据订单将不同品类的卷烟进行仓储、分拣、包装并配送至客户的服务活动。其中, 商业物流包装在烟草商业流通环节中发挥着集中、稳固和保护卷烟产品的重要作用。传统的烟草商业物流包装采用低密度聚乙烯 (Low Density Polyethylene, LDPE) 薄膜的热缩包装工艺实现, 具有能耗高且 LDPE 薄膜难以降解等问题。近年来, 大力推广绿色包装已成为烟草商业物流绿色化转型的重要举措。可降解薄膜具有质轻透明、原料来源广泛和包装性能良好的优势, 在满足烟草商业物流包装要求的同时, 能够在废弃后被降解并回归自然, 有助于显著减少传统卷烟商业包装所使用的 LDPE 薄膜造成的白色污染^[1]。烟草商业物流企业在卷烟分拣配送环节开展可降解薄膜包装的应用和优化的研究中, 所面临的主要困扰在于科学选取环境友好性突出且经济效益显著的可降解薄膜包装。基于此, 如何借助科学的环境影响评价手段, 系统而全面地评估可降解薄膜的低碳环保优势, 继而在兼顾经济和环境效益的基础上, 通过可靠的定量分析指导可降解薄膜包装工艺优化, 已成为卷烟物流可降解薄膜包装研究探索中亟待解决的关键问题。

环境绩效评价是反映企业或组织由于环境治理而取得的成绩或效果的监督手段^[2], 其测算结果是指导企业管理发展和决策研究的重要参考指标。近年来, 学者们针对不同的研究对象探索了多种环境绩效评价体系和方法^[3-6]。目前, 国内外关于环境绩效的测算方法主要包括主成分分析法、模糊综合评价法、平衡计分卡法、层次分析法和数据包络分析法等。其中, 数据包络分析法 (Data Envelopment Analysis, DEA) 具有无需预估参数和假设权重、无需考虑输入输出指标之间是否存在函数关系、可为无效单元提供改进方向等优点, 在评价多投入、多产出的复杂体系中具有明显的优势^[7-9]。传统的 DEA 模型包括规模收益不变的 CCR 模型和规模收益可变的 BBC 模型, 这 2 种模型都是在不考虑指标松弛的情况下, 需要假定输入或输出成比例变化, 使得评价结果与实际有所偏差。为了弥补上述缺陷, 2001 年 Tone^[10]提出了基于非径向、非角度的松弛测度模型 (Slacks-Based Measure, SBM), 在传统模型的基础上将松弛变量加入目标函数中, 同时又将非期望产出引入评价体系, 解决了传统 DEA 方法中所有输入或

输出只能等比例增加或缩减的问题, 能够更真实地衡量各决策单元的效率。Cheng 等^[8]兼顾经济和环境因素, 采用 SBM-DEA 模型评估了 681 个农村污水处理设施的环境绩效, 其评价结果不仅可以指导地方政府加强设施的监管和运营, 还能为我国农村污水处理设施的建设、运营和管理提供参考。赵艳等^[11]以资本和能源为投入指标, GDP 和环境负荷为产出指标, 运用 SBM-DEA 模型分析了江苏省 13 个地级市的环境效率。

因此, 本文以绿色低碳理念为指导, 根据可降解薄膜的力学性能确定适用的包装工艺。对可降解薄膜开展生命周期环境影响评价 (Life Cycle Assessment, LCA), 继而以总投资和电耗为投入指标, 以环境影响潜值和烟垛包装数为产出指标, 构建可降解薄膜包装的环境绩效指标体系。借助考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型开展可降解薄膜包装的环境绩效测算及冗余度分析, 旨在为烟草商业物流企业优选可降解薄膜及实现包装工艺升级提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 可降解薄膜研究对象

《2021—2023 中国快递业绿色包装碳减排潜力研究报告》指出, 快递包装的全生命周期碳排放在很大程度上受到原料阶段的影响。在众多的可降解薄膜原料中, 聚乳酸 (Polylactic Acid, PLA) 是以玉米为原料, 经淀粉生产、葡萄糖生产、乳酸生产和丙交酯生产等工序制成的可降解高分子聚合物, 在碳减排方面具有明显优势^[12], 但 PLA 韧性差、断裂伸长率低、质地硬而脆且价格高^[13]; 聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯 (Poly (butyleneadipate-co-terephthalate), PBAT) 是由 1,4-丁二醇 (Butane-1,4-diol, BDO)、己二酸 (Adipic Acid, AA) 和对苯二甲酸 (P-phthalic Acid, PTA) 聚合而成, 具有优异的柔韧性和较高的断裂伸长率^[14], 加工性能与 LDPE 比较接近, 产能大且价格低廉, 具有广泛的应用前景。因此, 本文选择了 8 种由 PLA 和 PBAT 为主要原料的可降解包装薄膜作为研究对象, 各薄膜的成分及市场售价见表 1。同时将传统卷烟商业包装所使用的 LDPE 薄膜作为对照, 其售价为 1.58 万元/t。

表1 8种可降解包装薄膜的成分及售价
Tab.1 Composition and price of eight degradable packaging films

薄膜编号	各成分质量分数/%				售价/(万元·t ⁻¹)
	PBAT	PLA	CaCO ₃	其他	
A	97	3	—	—	3.2
B	90	10	—	—	4.5
C	80	20	—	—	4.0
D	77	20	—	3	2.3
E	75	20	—	5	4.0
F	72	28	—	—	3.5
G	70	30	—	—	3.6
H	64	5	30	1	2.5

1.2 薄膜力学性能测试

薄膜的包装方式一般由薄膜的热收缩性以及穿刺强度、拉伸强度、断裂伸长率等力学性能测试结果确定。薄膜力学性能测试方法如下:

1) 拉伸强度和断裂伸长率的测试。使用 DR-5010A 万能试验机, 参照 GB/T 1040.3—2006《塑料拉伸性能的测定 第3部分: 薄膜和薄片的试验条件》对薄膜的拉伸强度和断裂伸长率进行测试。

2) 穿刺强度的测试。依据 GB/T 10004—2008《包装用塑料复合膜、袋干法复合、挤出复合》对薄膜的穿刺强度进行测试^[15]。

1.3 基于生命周期的可降解薄膜环境影响评价

生命周期评价通过收集产品从“摇篮到坟墓”整

个生命周期中的投入(物质和能源)与产出(污染物排放)评估其对环境产生的影响^[16], 该方法已纳入 ISO 14040 环境管理系列标准^[17], 并被广泛应用于不同产品、过程或服务的环境影响评价^[18-19], 可为行业精准减排提供依据和方向。由德国斯图加特大学和 PE 公司共同研发的 GaBi 软件是广泛应用于产品环境影响评价的分析软件之一^[20]。GaBi 软件具备全面、高质量的数据库系统^[21], 是目前全球各行业以及高校进行环境影响评估的主要工具^[22-23]。

因此, 本文首先确定了可降解薄膜的生命周期环境影响评价的系统边界(见图1), 并将其划分为原料阶段、生产阶段、使用阶段和处置阶段, 共计4个主要阶段, 各阶段运输过程所造成的环境影响均不考虑在系统边界之内。同时, 将系统的功能单元定义为1 t 包装薄膜, 并选择 GaBi 9.0(教育版)软件对所关注的薄膜的环境影响进行量化评价。所得到的环境影响潜能总值将作为薄膜包装的环境绩效测算的产出指标之一。

1.4 环境绩效研究方法

环境绩效的概念普遍以 ISO 14001 的定义“一个组织基于环境方针、目标和指标, 控制其环境因素所取得的可测量的环境管理系统成效”为权威和参考, 学者们在此基础上提出自己的看法和见解^[24-26], 其关注点始终围绕与企业发展相关的环境治理取得的成效, 是兼顾环境影响与经济效益实践决策的重要参考。

1) 模型的测算方法。本文采用考虑非期望产出的、基于松弛测度的非径向、非角度 SBM-DEA 模型评价可降解薄膜包装的环境绩效, 选用 DEA-SOLVER pro5.0 软件开展环境绩效测算。

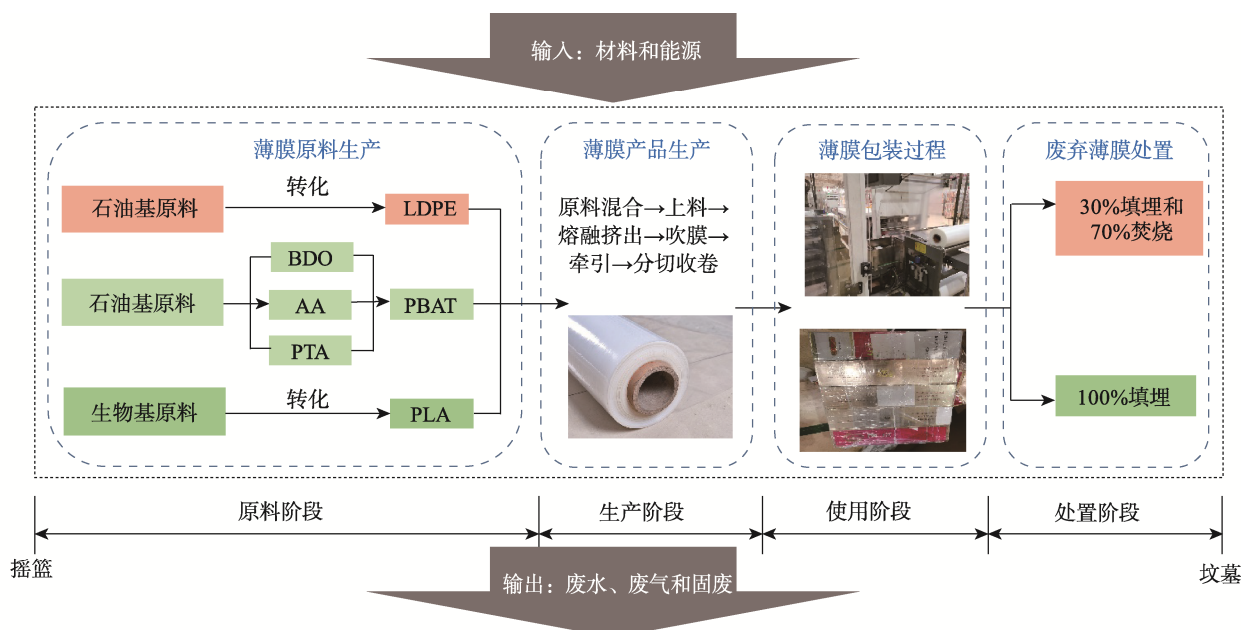


图1 烟草商业物流包装薄膜的生命周期系统边界
Fig.1 LCA system boundary of tobacco commercial packaging films

2) 环境绩效指标体系的构建。环境绩效指标的选取一般需遵循科学性、系统性、可行性、可比性和成本性的原则^[27]。本文依据 ISO 14031 中环境绩效指标框架结构及指标选取原则, 构建的烟草商业物流可降解包装的环境绩效指标体系见表 2, 其中总投资包括包装设备投资、薄膜经济成本、设备运行费用(电费)和人员工资。

表 2 环境绩效指标体系
Tab.2 Environmental performance indicator system

指标类别	指标名称	具体指标
投入指标	资本	总投资/万元
	能源	电耗/(kW·h)
产出指标	包装效率(期望产出)	烟垛包装数/包
	环境影响(非期望产出)	环境影响潜值

2 结果与讨论

2.1 薄膜力学性能测试及包装工艺选择

本文测试了 LDPE 和 8 种可降解薄膜的力学性

能, 具体包括穿刺强度、拉伸强度、断裂伸长率, 测试结果如表 3 所示。具体包括: 传统的烟草商业物流包装采用 LDPE 薄膜热缩包装工艺; C、D 和 E 3 种可降解薄膜具有一定的耐穿刺性和热收缩性, 适用于热缩包装; 其他可降解薄膜则采用缠绕包装方式, 其中, A、B 和 G 可降解薄膜较薄、拉伸强度较大、断裂伸长率较低、穿刺强度相对较高, 在承受一定拉力的同时不易变形, 可起到固定保护商品的作用, 因而适用于横向一圈、纵向三圈的缠绕包装 I 的包装模式, 见图 2a; F 和 H 可降解薄膜较厚、韧性好、穿刺强度适中, 适用于横向一圈、纵向一圈的缠绕包装 II 的包装模式, 见图 2b。

2.2 基于生命周期的可降解薄膜环境影响评价

结合烟草商业物流包装薄膜全生命周期评价模型, 本文主要结合相关报告、调研数据及 GaBi 9.0(教育版)数据库开展可降解包装薄膜的环境影响评价和比较分析。评价模型中涉及到的包装薄膜生命周期各阶段的基础数据见表 4。

表 3 可降解薄膜的力学性能及包装方式
Tab.3 Mechanical properties of degradable films and corresponding packaging manners

薄膜编号	厚度/mm	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	穿刺强度/N	包装方式
LDPE	0.061	24.69	331.81	758	热缩包装
A	0.021	32.27	214.21	282	缠绕包装 I
B	0.030	21.75	526.2	421	缠绕包装 I
C	0.050	21.02	242.33	218	热缩包装
D	0.032	28.81	173.38	269	热缩包装
E	0.050	48.70	124.19	1 460	热缩包装
F	0.060	16.05	584.67	343	缠绕包装 II
G	0.028	33.64	261.47	461	缠绕包装 I
H	0.054	13.83	544.75	201	缠绕包装 II

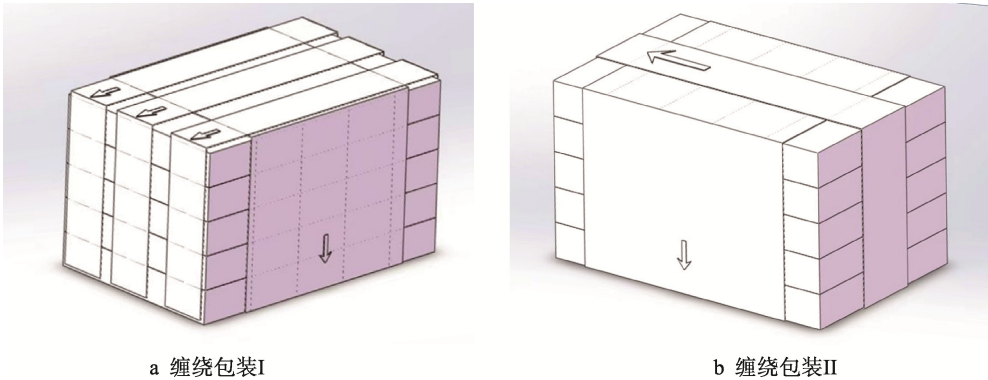


图 2 缠绕包装方式示意图
Fig.2 Schematic diagram of wrapping packaging method

表 4 可降解包装薄膜生命周期各阶段的基础数据
Tab.4 Basic data of degradable packaging film at different stages of life cycle

阶段	活动内容		能源消耗	直接排放	数据来源
原料阶段	薄膜相关原料的生产过程	PBAT	*	*	GaBi 9.0(教育版)软件内置数据库、相关环评报告 ^①
		PLA	*	*	
		LDPE	*	*	GaBi 9.0(教育版)软件内置数据库
		CaCO ₃	*	*	
生产阶段	薄膜的生产过程	混合-进料-熔融挤出-吹膜-牵引-分切收卷	400 kW·h	0.62 kg 非甲烷总烃	薄膜生产厂家的实地调研
使用阶段	卷烟分拣包装环节完成包装使命的过程	热缩包装	3 318 kW·h	无	西安市烟草公司物流中心现场调研
		缠绕包装 I	1 320 kW·h		
		缠绕包装II	943 kW·h		
处置阶段	不可降解 LDPE 薄膜废弃处置	30%填埋和 70% 焚烧	*	*	GaBi 9.0(教育版)软件内置数据库
	可降解薄膜废弃处置	100%可降解废物填埋	*	*	

注：环评报告^①来源于 <http://111.6.107.78:18080/portal/hjgs/hjyxpjgs/webinfo/2021/11/1637366721641451.htm>；*表示由 GaBi 9.0(教育版)软件内置数据库提供；能源消耗和直接排放均为每吨膜的相关数据；根据《中国统计年鉴 2021》和《中国统计年鉴 2022》中我国生活垃圾处理方式确定 LDPE 薄膜的处置方式为 30%填埋和 70%焚烧。

通过生命周期环境影响评价得到 9 种烟草商业物流包装薄膜的环境影响潜能总值，如图 3 所示。可以看出，不同薄膜生命周期环境影响潜能总值从大到小的排序依次为 C、D、E、LDPE、A、B、G、F、H。总体而言，原料阶段和使用阶段是总环境影响潜值中贡献较大的 2 个阶段。从原料阶段的环境影响来看，LDPE 薄膜原料阶段的环境影响贡献较小，主要是由于 LDPE 的生产原料（乙烯）较为单一，该石油基原料的制备工艺较为成熟；而可降解薄膜的原料阶段环境影响贡献则较大，且影响程度与薄膜中 PBAT 的含量相关。原因是作为可降解薄膜中重要组分的 PBAT 目前是由 3 种石油基原料（BDO、AA 和 PTA）经过复杂的制备工艺获得的，具有较大的环境影响潜值。随着生物技术的不断发展，生物法制备 BDO^[28]等生产技术升级将有望在不久的将来有效降低 PBAT/PLA 可降解薄膜的环境影响潜值。从使用阶段的环境影响来看，采用热缩包装的可降解包装薄膜 C、D 和 E 的环境影响潜能总值明显大于 LDPE 薄膜的，而采用缠绕包装的可降解薄膜 A、B、F、G 和 H 的环境影响潜能总值则小于 LDPE 薄膜的，说明不同的包装方式是造成薄膜使用阶段环境负荷差异的主要原因。热缩包装的环境影响潜值大与加热包装设备的高耗能关系密切，而缠绕包装具有节能降碳的突出优势，符合“双碳”背景下烟草商业物流绿色发展的需求。从环境影响潜能总值来看，可降解包装薄膜 A、B、F、G 和 H 的环境影响均低于 LDPE 薄膜的，具有更好的环境友好性。

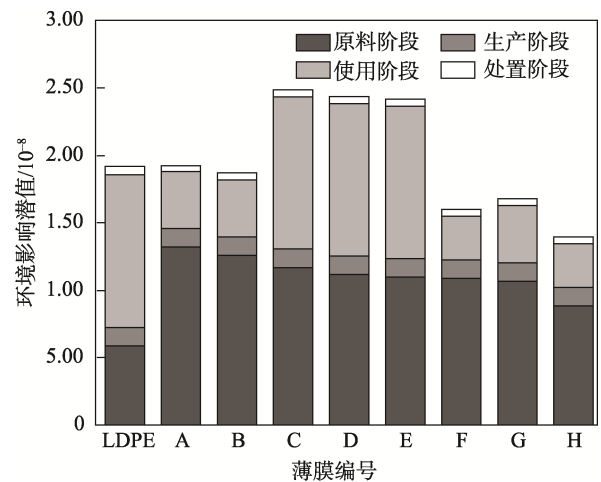


图 3 可降解包装薄膜的环境影响潜能总值

Fig.3 Total environmental impact potential of degradable packaging films

2.3 基于 SBM-DEA 的可降解薄膜包装环境绩效测算

1) 研究对象及数据来源。选取“10 t 包装薄膜+一条包装生产线”作为薄膜包装的决策单元，基于 DEA-SOLVER pro5.0 软件对烟草商业物流包装场景下可降解薄膜包装的环境绩效进行测算。指标数据（总投资、电耗、烟垛包装数）均来源于陕西省烟草公司西安市公司卷烟物流配送中心的实地调研，环境影响潜值来源于薄膜生命周期环境影响评价结果（见图 3），环境绩效评价的具体数值见表 5。

表 5 烟草商业物流包装的环境绩效评价指标数值
Tab.5 Values of environmental performance evaluation indicators of tobacco commercial film packaging

决策单元	投入指标		产出指标	
	总投资/万元	电耗/(kW·h)	环境影响潜值/ 10^{-7}	烟垛包装数/(10^4 包)
LDPE+热缩包装	97.538	33 180	1.920	28
A+缠绕包装 I	103.030	12 300	1.930	32
B+缠绕包装 I	113.030	12 300	1.865	32
C+热缩包装	121.738	33 180	2.482	28
D+热缩包装	104.738	33 180	2.442	28
E+热缩包装	121.738	33 180	2.415	28
F+缠绕包装 II	102.323	9 430	1.599	23
G+缠绕包装 I	104.030	12 300	1.678	32
H+缠绕包装 II	92.323	9 430	1.397	23

2) 环境绩效测算结果分析。从表 6 可以看出, 9 种薄膜包装中 A+缠绕包装 I 和 G+缠绕包装 I 的环境绩效处于有效状态 ($=1$), 而其他薄膜包装 (B+缠绕包装 I、C+热缩包装、D+热缩包装、E+热缩包装、F+缠绕包装 II、H+缠绕包装 II 和 LDPE+热缩包装) 的环境绩效处于非有效状态 (<1)。因此, 在兼顾环境影响和经济因素的基础上, 确定 A+缠绕包装 I 和 G+缠绕包装 I 是烟草商业物流可降解包装的优选方案。另外, 从图 4 中薄膜不同包装方式的环境绩效对比可以看出, 可降解薄膜缠绕包装的环境绩效均高于其他薄膜的热缩包装, 表明包装工艺的改进升级有助于环境绩效的显著提升。

表 6 可降解薄膜包装的环境绩效测算结果
Tab.6 Environmental performance measurement results of degradable film packaging

决策单元	环境绩效值	排序
LDPE+热缩包装	0.674 106	6
A+缠绕包装 I	1	1
B+缠绕包装 I	0.940 036	3
C+热缩包装	0.554 550	9
D+热缩包装	0.598 234	7
E+热缩包装	0.560 020	8
F+缠绕包装 II	0.823 421	5
G+缠绕包装 I	1	1
H+缠绕包装 II	0.887 773	4

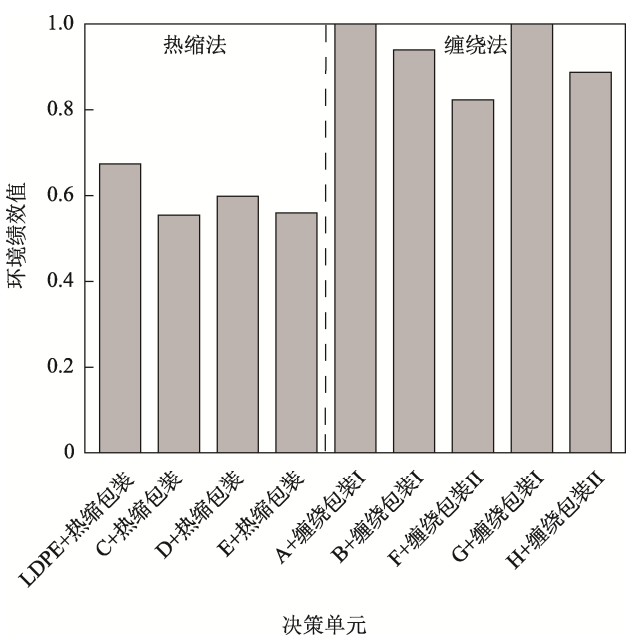


图 4 可降解薄膜包装的环境绩效
Fig.4 Environmental performance of degradable film packaging

3) 环境绩效非有效分析。SBM-DEA 模型通过将松弛变量引入目标函数中, 可为环境绩效非有效的决策单元提供冗余度信息, 用于辨析无效决策单元非有效性的可能原因。因此, 本文以 7 个可降解薄膜包装非有效决策单元为研究对象, 结合冗余度分析进一步识别烟草商业物流薄膜包装环境绩效的非有效原因。旨在探究影响可降解薄膜包装环境绩效的潜在因素, 揭示出包装薄膜实现低碳目标的改进方向和潜力。

由表 7 可知,环境绩效较低的 7 种薄膜包装环境绩效非有效的原因主要涉及投入过剩或产出不足 2 个方面。从投入指标来看,B+缠绕包装 I、H+缠绕包装 II 和 F+缠绕包装 II 可降解薄膜包装存在经济成本较高的问题,源于可降解薄膜 B 的价格较高,以及 H 和 F 可降解薄膜包装效率低等;同时,电耗也是 LDPE、C、D、E 薄膜采用热缩包装环境

绩效非有效的主要原因。从产出指标来看,包装效率低是制约薄膜包装环境绩效的主要因素。因此,基于冗余度分析对薄膜包装环境绩效非有效原因的深入剖析,推测限制可降解薄膜包装进一步发展和推广的主要因素为经济成本和包装效率。上述结果可为可降解薄膜包装进一步优化的研究提供理论参考。

表 7 环境绩效较低的可降解薄膜包装的环境绩效冗余度分析
Tab.7 Redundancy analysis of environmental performance for degradable film packaging with poor environmental performance

排序	决策单元	投入过剩			产出不足
		总投资	电耗	环境影响潜值	烟垛包装数
3	B+缠绕包装 I	-9	0	0	0
4	H+缠绕包装 II	-10.77	0	0	13 142.86
5	F+缠绕包装 II	-20.77	0	0	13 142.86
6	LDPE+热缩包装	0	-21 647.58	0	20 030.38
7	D+热缩包装	0	-20 796.29	0	42 177.83
8	E+热缩包装	0	-18 786.29	0	94 470.44
9	C+热缩包装	0	-18 786.29	0	94 470.44

注:表中负号表示达到环境绩效有效前沿面需要减少的数量。

3 结语

本文运用科学的评价和分析手段,开展可降解薄膜的生命周期环境影响评价,有助于全面分析可降解薄膜的环境友好性,证实由热缩包装到缠绕包装的工艺改进升级有利于显著降低环境影响;在兼顾环境影响和经济因素的基础上,通过环境绩效测算确定 A+缠绕包装 I 和 G+缠绕包装 I 为烟草商业物流可降解薄膜包装的优选方案;分析了可降解薄膜包装进一步优化发展的主要因素,降本增效是可降解薄膜包装优化研究的重要方向。研究结论可为烟草商业企业可降解薄膜包装的应用提供决策参考,有利于充分挖掘可降解薄膜包装的环境效益和社会价值,助力烟草物流低碳路径的研究和新发展格局的构建。

参考文献:

[1] ZHANG X F, LUO C L, REN H X, et al. Fully Biodegradable Film to Boost Rainfed Maize (*Zea Mays* L.) Production in Semiarid Kenya: An Environmentally Friendly Perspective[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 119(1): 126124.

[2] 刘洋. 基于 DEA 的 B 市制造业企业环境绩效评价[J]. *内蒙古科技与经济*, 2021(11): 48-50.

LIU Y. Environmental Performance Evaluation of Manufacturing Enterprises in B City Based on DEA[J]. *Inner Mongo-*

lia Science Technology & Economy, 2021(11): 48-50.

[3] 陈敏敏, 吴琼, 张震, 等. 我国城镇污水处理厂环境绩效评价研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(12): 2675-2682.

CHEN M M, WU Q, ZHANG Z, et al. Environmental Performance Assessment of Municipal Wastewater Treatment Plants in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(12): 2675-2682.

[4] DJORDJEVIC B, MAITRA R, GHOSH B. Environmental Efficiency Assessment of Dublin Port Using Two-stage Non-radial DEA Model[J]. *Maritime Transport Research*, 2023, 4: 100078.

[5] ZHANG L N, DU X Y, CHIU Y H, et al. Measuring Industrial Operational Efficiency and Factor Analysis: A Dynamic Series-Parallel Recycling DEA Model[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158084.

[6] 张梅, 吴永涛, 石磊, 等. 农村环境绩效评估指标体系研究[J]. *环境保护*, 2020, 48(16): 56-60.

ZHANG M, WU Y T, SHI L, et al. Study on the Index System of Rural Environmental Performance Evaluation[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(16): 56-60.

[7] SUEYOSHI T, GOTO M. Environmental Assessment on Coal-fired Power Plants in U.S. Porth-east Region by DEA Non-radial Measurement[J]. *Energy Economics*, 2015, 50: 125-139.

[8] CHENG P P, JIN Q, JIANG H, et al. Efficiency Assessment of Rural Domestic Sewage Treatment Facilities by A Slacked-Based DEA Model[J]. *Journal of*

- Cleaner Production, 2020, 267: 122111.
- [9] RÍOS A, PICAZO-TADEO A J. Measuring Environmental Performance in the Treatment of Municipal Solid Waste: The Case of the European Union-28[J]. Ecological Indicators, 2021, 123: 107328.
- [10] TONE K. A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [11] 赵艳, 孙翔, 朱晓东. 基于 DEA 的江苏省环境效率研究[J]. 环境保护科学, 2011, 37(4): 41-43.
ZHAO Y, SUN X, ZHU X D. Analysis of Environmental Efficiencies in Cities of Jiangsu Province with IDEA Theory[J]. Environmental Protection Science, 2011, 37(4): 41-43.
- [12] 孟亚彬, 孙万意, 迟晓光, 等. PBAT、PLA 和 PLA/PBAT 共混塑料包装袋的碳足迹分析[J]. 当代化工研究, 2023(3): 46-48.
MENG Y B, SUN W Y, CHI X G, et al. Carbon Footprint Analysis of PBAT, PLA and PLA/PBAT Plastic Packaging Products[J]. Contemporary Chemical Research, 2023(3): 46-48.
- [13] LIU H Z, ZHANG J W. Toughening Modification of Poly(Lactic Acid) via Melt Blending[J]. ACS Symposium Series, 2012, 1105: 27-46.
- [14] 管羽, 付焯, 翁云宣. 生物降解聚酯降解性能调控研究进展[J]. 中国塑料, 2023, 37(3): 103-112.
GUAN Y, FU Y, WENG Y X. Research Progress in Regulation of Degradation Performance of Biodegradable Polyesters[J]. China Plastics, 2023, 37(3): 103-112.
- [15] 梁世何, 应永伟. 软包装及塑料薄膜机械性能检测分析[J]. 印刷技术, 2016(14): 42-44.
LIANG S H, YING Y W. Analysis of Mechanical Performance Testing for Flexible Packaging and Plastic Film[J]. Printing Technology, 2016(14): 42-44.
- [16] 郭安福, 唐娟, 徐婕, 等. 基于全生命周期理论的生物基包装材料环境友好性模型与评价[J]. 化工新型材料, 2017, 45(7): 138-140.
GUO A F, TANG J, XU J, et al. Model and Assessment of Environmental Property of Biomass Packaging Material Based on LCA[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(7): 138-140.
- [17] 国际标准化组织. 环境管理-生命周期评价-原则与框架: ISO14040[S]. 日内瓦: 国际标准化组织, 2006: 41. International Organization for Standardization. Environmental Management-life Cycle Assessment-principles and Framework: ISO14040[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006: 41.
- [18] DELPIERRE M, QUIST J, MERTENS J, et al. Assessing the Environmental Impacts of Wind-based Hydrogen Production in the Netherlands Using Ex-ante LCA and Scenarios Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 299: 126866.
- [19] REYHANI M, SANTOLINI E, TORREGGIANI D, et al. Assessing the Environmental Performance of Plastic-Based and Felt-Based Green Wall Systems in a Life-Cycle Perspective[J]. The Science of the Total Environment, 2022, 822: 153648.
- [20] 江楠. 基于 GABI 平台的供应链优化模型研究[J]. 时代经贸, 2016(3): 77-82.
JIANG N. Research on Supply Chain Optimization Model Based on GABI Platform[J]. Times of Economic and Trade, 2016(3): 77-82.
- [21] 杨鸣. 机电产品模块化生命周期评价方法研究及其软件开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 8-9.
YANG M. Research on Modular Life Cycle Assessment Method of Electromechanical Product and Its Software Development[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 8-9.
- [22] MIR N, KHAN S A, KUL A, et al. Life Cycle Assessment of Binary Recycled Ceramic Tile and Recycled Brick Waste-Based Geopolymers[J]. Cleaner Materials, 2022, 5: 100116.
- [23] KHATRI P, JAIN S, PANDRY S. A Cradle-to-Gate Assessment of Environmental Impacts for Production of Mustard Oil Using Life Cycle Assessment Approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166(10): 988-997.
- [24] TRUMPP C, ENDRIKAT J, ZOPF C, et al. Definition, Conceptualization, and Measurement of Corporate Environmental Performance: A Critical Examination of a Multidimensional Construct[J]. Journal of Business Ethics, 2015, 126(2): 185-204.
- [25] 杨丽青. 煤炭企业环境绩效评价研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2018: 10.
YANG L Q. Environmental Performance Evaluation System Research on Coal Enterprises[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2018: 10.
- [26] 王宗婉, 王宗宇. 社会责任视角下我国制药企业环境绩效评价研究[J]. 对外经贸, 2021(3): 43-48.
WANG Z W, WANG Z Y. Research on Evaluation of China Pharmaceutical Corporation Environmental Performance Based on Perspective of Social Responsibility[J]. Foreign Economic Relations & Trade, 2021(3): 43-48.
- [27] 刘洋. 基于 DEA 的企业环境绩效评价研究[D]. 内蒙古: 内蒙古科技大学, 2021: 4.
LIU Y. Research on Corporate Environmental Performance Evaluation Based on DEA[D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021: 4.
- [28] 赵巍. 生物基 1, 4-丁二醇的研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2018, 16(4): 45-50.
ZHAO W. Research Progress of Bio-Based 1, 4-Butanediol[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2018, 16(4): 45-50.