

doi:10.3969/j.issn.1000-7695.2023.16.009

优化企业生态效率评价的生命周期评价 (LCA) – 物质流成本会计 (MFCA) 整合方法

刘三红¹, 梁雯², 张伟³

- (1. 绍兴文理学院商学院, 浙江绍兴 312000;
2. 杭州电子科技大学会计学院, 浙江杭州 310018
3. 绍兴文理学院元培学院, 浙江绍兴 312000)

摘要: 为更客观、准确评价企业制造过程的生态效率水平, 弥补现有文献未见考虑结合生命周期分析 (LCA) 和物质流成本会计 (MFCA) 评价方法的缺失, 通过探讨 LCA 和 MFCA 之间的联系和区别, 开发整合 LCA 和 MFCA 的企业生态效率评价方法。LCA-MFCA 方法主要包括 3 个步骤: 采用物质平衡分析、MFCA、LCA 量化企业有关物质和经济损失以及外部环境损害成本; 通过帕累托法则原理和假设分析、实地采访和参考现有文献, 识别企业经济活动每个流程或物量中心中对环境损害影响最大的因素, 基于此提出改进方案; 通过重新执行 MFCA 和 LCA 来验证所提建议的改进选项。将 LCA-MFCA 方法运用于 A 水泥生产企业生态效率评价, 借鉴日本的环境损害综合系数表 (LIME) 计算其主要物量中心所产出废弃物的外部损害成本, 认为生料制成中心、窑尾预分解中心和煤粉制备中心等急需进行改进, 同时提出使用袋除尘器代替原来的电除尘器、以电石渣取代石灰石和安装低温余热系统等 3 种优化方案。经验证, LCA-MFCA 评价方法可行, 不仅能够给企业带来更多的利润, 还能减少企业对不可再生资源的耗费, 达到优化生态效率的目标。

关键词: 企业生态效率评价; 生命周期评价; 物质流成本会计; 外部环境损害; 循环经济

中图分类号: X7; G301

文献标志码: A

文章编号: 1000-7695 (2023) 16-0070-09

Life Cycle Assessment(LCA)-Material Flow Cost Accounting(MFCA) Integration Method Optimizing the Enterprise Ecological Efficiency Evaluation

Liu Sanhong¹, Liang Wen², Zhang Wei³

- (1. Business School, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;
2. School of Accounting, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
3. Shaoxing University Yuanpei College, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to more objectively and accurately evaluate the eco-efficiency level of manufacturing processes of enterprises, and make up for the lack of combining life cycle assessment (LCA) and material flow cost accounting (MFCA) evaluation methods in existing literatures, an enterprise eco-efficiency evaluation method integrating LCA and MFCA is developed by exploring the relationship and difference between LCA and MFCA. The LCA-MFCA method mainly consists of three steps: quantify the material and economic losses and external environmental damage costs of enterprises by material balance analysis, MFCA, LCA; identify the greatest impact environmental and economic factors in each process or quantity centre and propose improvement plans through the principle and hypothesis analysis of Pareto law; verify the suggested improvement options by re-executing MFCA and LCA. The LCA-MFCA method is applied to the eco-efficiency evaluation of A cement production enterprise, and the external damage cost of the waste produced by its main material centers is calculated by referring to the comprehensive coefficient of environmental damage (LIME) of Japan. It is considered that the raw meal making center, kiln head precalcining center and cement grinding center are in urgent need of improvement, at the same time, three optimization schemes are proposed, which are using bag dust collector instead of electric dust collector, replacing limestone with calcium carbide slag and installing low temperature waste heat system. It proves that the LCA-MFCA evaluation method is feasible, which can not only bring more

收稿日期: 2023-02-14, 修回日期: 2023-09-29

基金项目: 浙江省哲学社会科学规划项目“基于 MFCA 的政府环境政策制定与企业废弃物资源化决策研究”(21NDJC074YB); 国家社会科学基金项目“市场化交易背景下工业废弃物资源化利益协同创新机理、模式与实现路径研究”(21BGL184)

profits to enterprises, but also reduce the consumption of non-renewable resources and achieve the goal of optimizing ecological efficiency.

Key words: enterprise eco-efficiency evaluation; life cycle assessment; material flow cost accounting; external environmental damage; circular economy

1 相关理论与概念

经济和环境效益的综合评价成为经济活动决策中的一个重要环节。Schaltegger 等^[1]于 1990 年提出“生态效率”这一概念，并用于评判经济增长和环境问题，由此引发了学界的研究与关注。世界企业永续发展委员会（WBCSD）^[2]、国际标准化组织（ISO）^[3]等都提出了以生态效率来衡量经济活动的环境绩效，认为生态效率的相关研究有助于减少材料和能源消耗、减少有毒物质排放、能源回收利用、可再生能源和延长产品生命周期。生态效率可以用经济产出与环境投入之间的相对比值来衡量，使用该指标衡量经济活动的环境效率对于提高经济产出和减少环境负荷有着非常独特的作用。

Dewulf 等^[4]、Orea 等^[5]和 Kounetas 等^[6]提出了一系列衡量和优化生态效率的方法，包括数据包络方法（DEA）、环境影响评价（EIA）、环境管理系统（EMS）、环境设计（DFE）、生命周期评价（life cycle assessment, LCA）和物质流分析（MFA）等。物质流成本会计（material flow cost accounting, MFCA）是一种将生产流程中的经济和环境方面可改善潜力点进行可视化的重要方法，通过对资源的物质流动和价值流动相联结，达到减少资源浪费和环境污染的目的^[7]。利用 MFCA 可以同时达到提升经济效益和环境效益的效果，最终实现生态效率优化的目的。MFCA 的基本理念已经引起了诸多学者的广泛关注，在以日本为首的诸多国家，很多企业将这一方法运用于生产实践中并取得了一系列成果^[8]。但在 MFCA 的实施过程发现，局限于物质流、能量流以及企业边界上物质损失的量化和可视化是提高生态效率的主要障碍^[9]，因此，笔者认为将 MFCA 与 LCA 相结合可以弥补简单 MFCA 分析的局限，提升生态效率评价效用。基于生态效率的衡量原则和优化方法，借鉴 WBCSD 关于生态效率指标与 MFCA、LCA 相关概念，提出生态效率不仅要衡量产出价值和废弃物排放水平，还应当衡量资源产出价值与资源投入之间的数量关系，即：

生态效率 = 资源有效增加价值 / 外部环境损害价值 (1)

式（1）中：资源有效增加价值衡量的是资源流转中的有效产出和投入资源之间的差额，为经济指标；外部环境损害价值衡量产品生命周期中对外排

放的废弃物的环境损害价值，衡量产品或生产流程的环境效益。

现有文献也有关于 MFCA 和 LCA 结合的研究，但基本仍停留在理论探讨层面，尚未形成一种具体可操作性的方法。本研究对 LCA 与 MFCA 结合原理进行分析，聚焦于该方法在企业中实施需要考虑的以下几个方面：如何将 MFCA 与外部环境的影响相结合；如何从生命周期的角度使 MFCA 为环境影响的决策支持服务；如何利用 LCA 和 MFCA 来提高生态效率。基于 LCA 和 MFCA 的结合，对企业制造过程的生态效率进行评价，以 MFCA 识别生产流程中的废弃损失，并以 LCA 方法指导其优化改善，最终达到提升生态效率的目的。

2 LCA 与 MFCA 结合机制分析

MFCA 于 20 世纪后半叶起源于德国，经过日本等国的发展，成为环境管理会计的一种重要方法，其基本框架在 ISO^[10-12]颁布的 ISO 14051、ISO 14052、ISO 14053 等国际标准中得到体现和扩展。日本将 MFCA 作为工业生产中提高资源生产率的管理方法，并将其确定为环境管理的国际规格的指导方针之一^[13]。但是，企业在采用 MFCA 时考虑的首要问题是能否实现成本削减效果，仅仅实施 MFCA 将面临着环境保护和利益提高是否同等达成的问题^[7]。也有研究指出，MFCA 只有提高资源生产性这一有限的环境保护效果，而且由于优先改善成本，未必能促进对环境保护的积极改善^[14]。与此相对，LCA 考虑了产品或工艺的全过程，通过查明和量化使用的物质和能源以及排放到环境中的污染物，以评估对环境的影响^[15]；LCA 虽然不能评价经济效率，却能有效评价其环境负荷^[16]。因此，以 MFCA 评价企业内部的经济效率、以 LCA 评估企业生产流程外部的环境负荷，两者相结合可以实现同时提高经济效率和降低环境负荷的目的。

2.1 MFCA 与 LCA 的比较

LCA 和 MFCA 的主要区别如表 1 所示。LCA 关注的重点是环境影响，系统边界一般涵盖产品、过程或服务从“摇篮”到“坟墓”的整个生命周期；相比之下，MFCA 关注的重点是企业相关的物料和能源消耗，主要关注具体生产制造环节的资源使用效率^[13]。具体到核算的主体，MFCA 主要关注特定

主体的经济利益，以一个生产阶段或环节为物量中心，关注这一过程中的资源成本相关信息；而 LCA 不仅关注特定生产者的成本等价值信息，更从整个产业链出发，关注其整个生命周期中所涉及的生态和环境影响，包括生产系统内部的和外部的影响^[16]。两种方法的应用目标也不相同：LCA 既可用于外部沟通，也可用于挖掘优化潜力，更注重通过核算生态信息或环境影响来进行决策，更关注如何减轻环境影响；而 MFCA 主要用于企业内部应用，关注采用何种方法提升企业产品的价值信息和经济效益。因此，MFCA 能够对资源损失和环境负荷的实物量以及货币化进行计量，可通过优化企业或产业链内部的工艺优化而提升资源效率，适用于企业的优化决策^[8]；而 LCA 更适合于从产品整个生命周期角度减少环境或生态影响，实现可持续发展。

表 1 LCA 与 MFCA 的主要区别

项目	LCA	MFCA
重点	环境影响	资源和能量效率
系统边界	整个生命周期	企业
主体	供应商、制造商、消费者	制造商
目标群体	公共的和内部的	内部的
核算对象	物量中心	产品
核算内容	生态信息或环境影响	价值信息

尽管 MFCA 和 LCA 存在诸多不同，但二者在系统模型、方法（流量网络）和数据（流量）方面非常相似，都关注产品生产的整个生命周期中物质流动的情况，体现产品全生命周期的理念。其中，LCA 的一系列过程都建立在生产过程中物质流量分析的基础上，而 MFCA 的物质流量分析是 LCA 顺

利进行的基础^[13]，MFCA 通过减少废弃物数量来降低成本，以提高企业生产力，这有助于 LCA 对生态效益提升的促进作用。另外，MFCA 与 LCA 单独使用时各有不足，如 MFCA 未涵盖环境影响这一方面；利用 LCA 对企业外部环境损害作出评价时，投入产出清单的产出量往往不容易确定，但在运用 MFCA 中，一个物料中心的投入、产出都遵循物质流平衡原理，只要掌握了物质和能源的投入，就可以计算出某物料中心的产出清单及其物质量。

2.2 LCA-MFCA 方法的基本原理

将环境影响添加到 MFCA 信息中有助于解决信息共享问题，因此，将 LCA 中的环境影响并入 MFCA、从产品的整个生命周期来实现废弃物的削减将是解决 MFCA 短期性局限的一个解决方法^[9]。在供应链上部署 MFCA 时，企业可能不愿意共享成本信息，但实物量信息的共享相对来说难度并不高；此外，通过具体的评估方法（如使用 CO₂ 作为 LCA 的综合系数等）来评估物质和能源的流动和损失，可以依据具体环境保护方面（如减少温室效应气体）的观点来确定实施循环经济优化的优先顺序，从而减少材料损失。从长期来看，通过供应链减少温室气体等推进环境保护的行为可能会得到投资者和消费者的认同，从而获得经济效益的提升，因此，在聚焦于减少物质损失的决策中，供应链中企业可以在根据温室效应气体排放等信息决定实施循环经济优化的优先顺序和估计减少污染物排放效果的同时进行成本评估。LCA-MFCA 方法的基本思路如图 1 所示。

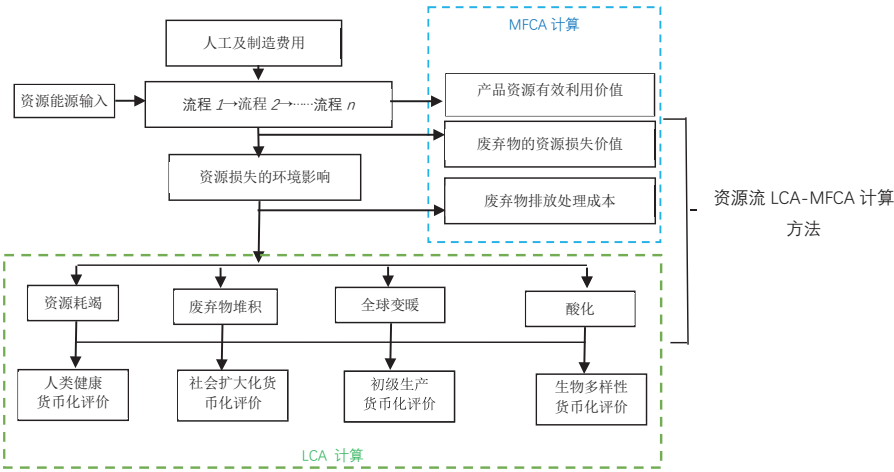


图 1 LCA-MFCA 方法的整体思路和框架

从图 1 可见，MFCA 和 LCA 都可以对产品全生命过程中的物质流动进行分析，一方面以 MFCA 方法进行物流成本核算，计算产业链中有效利用价

值和资源损失价值，寻找资源价值损失和优化潜力点，另一方面以 LCA 方法对废弃物进行外部环境损害成本计算，评估生产流程中的环境损害点，分析

环境保护的重点环节，采用 MFCA 方法对可能的优化措施进行成本估算和经济效益评估，在此基础上评估产业链、企业、生产流程的生态效率，并提出相应的优化决策。具体而言，使用 MFCA 跟踪和控制各种物质和能源，得到每个流程或物量中心的产出清单和物质量，进而计量企业经济活动过程中各项活动所造成的环境损害及其处理方法，并最终进行货币化，以核算出企业的外部环境成本。

2.3 实施 LCA-MFCA 生态效率优化的步骤

首先，通过追踪物质流动路径、量化物质流动数据进行物质平衡分析，并据此计算 MFCA 和 LCA 的评价结果，获取生态效率数据。其次，依据帕累托分析和假设分析等方法，识别成本损失和环境损害的关键因素，识别问题并提出最可行的改进方案。第三，验证改进潜力。采用的具体工具和数据技术集成方法如图 2 所示。

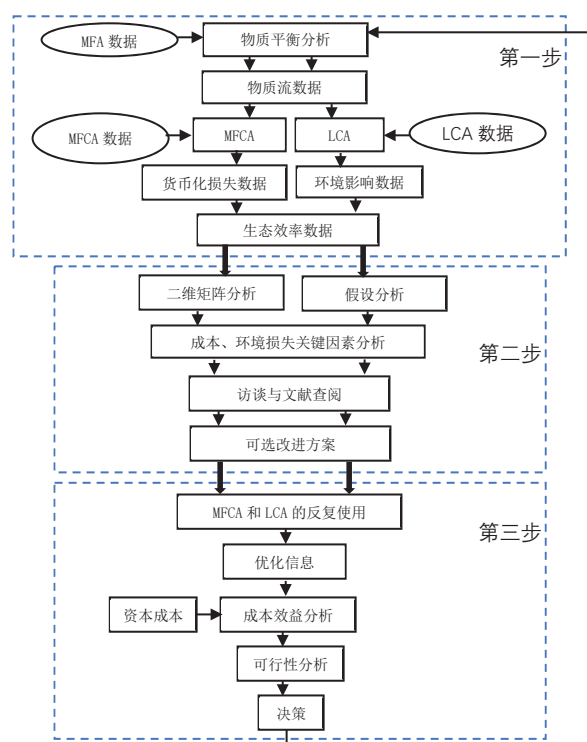


图 2 基于 LCA-MFCA 的生态效率优化步骤

第一步，生态效率量化。根据定义的系统边界收集相关数据，可以将系统边界定位于整个生命周期，也可以参考企业实践数据、文献和数据库提供的数据等，确定为产品生命周期中最有影响力的环节。在进行全生命周期分析时，要考虑产业链上中下游生命周期企业的参与意愿，并考虑到中间产品使用过程及报废过程对生态效率的影响程度。可以根据物质流转的路径细分为多个物质流转中心，根

据物质流动建立物质平衡表/图，以明确资源等的流转路径和数量，以此量化数据为基础，具体分配相关物质流成本数据和生命周期数据；其中常用的分配标准有材料数量、重量、工时等，也可以采用经济评估，但由于经济数据可能来源于 MFCA，在进行 LCA 分配和评估时一般不建议采用经济指标等作为标准，可以根据元素流数量、体积、面积等进行分配。

第二步，改进方案的提议，目标在于确定影响资源损失成本和环境损害成本最有影响力的因素以及确定可行的改进方案。实施过程中，通常可以采用帕累托分析、经济与环境二维矩阵和假设分析作为工具，以确定每个流程中影响最大的资源损失和环境损害因素。依据帕累托法则原理，80% 的问题是 20% 的原因所造成的^[17]，因此，将各项损失按照占总体损失的比例排列，以判断出其中关键因素；也可以选择将各流程（物量中心）损失置于同一二维表格中，根据各物量中心在二维表格中的位置发现其改善潜力；或是通过假设分析或者敏感性分析确定环境关键因素的变化对每个流程中环境损害或对总系统环境损害的影响程度，来识别每个流程（物量中心）中对环境损害影响最大的因素。为此，采用线性环境影响模型，观测对比模型中各参数每次改变 5% 的输出结果变化。

第三步，改进选项验证。为了验证上述第二步中确定的改进方案，假设这些方案都已落实到位，并采用 LCA-MFCA 集成方法验证方案的实施效果。开始时可以对方案中的选项进行单项验证，最后可以采用集成方法对应用了所有选项的方案（即组合方案）进行效果的模拟和验证。此外，在具体实施过程中不能忽略成本效益分析。

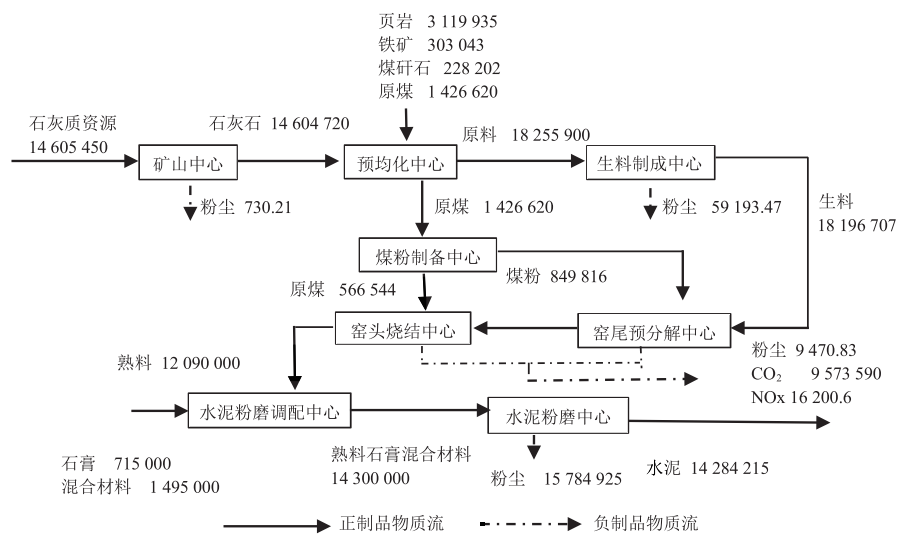
3 MFCA 实施案例

A 公司（以下简称“公司”）主要生产 32.5 R 和 42.5 R 等级的水泥，作为致污大户，为响应国家关于节能减排及发展循环经济的号召，达到节能降耗、提高生产效益，实现环境改善、降低污染物排放目标，公司决定采用 LCA-MFCA 方法改造产品全生命过程，以期提高生态效率。

3.1 生态效率量化

（1）物量中心界定。根据公司生产现状，结合生产工艺流程图，考虑到物量中心设置应当适度的原则，综合 LCA-MFCA 方法中物量中心划分流程标准，在考察公司生产流程和成本报表归集明细后，对生产组织进行物量中心再分，并借鉴朱鹏^[18]的研究，设置了矿山中心、预均化中心、生料制成中心、

煤粉制备中心、窑尾预分解中心、窑头烧结中心、水泥粉磨调配中心、水泥粉磨中心 8 个生产物量中心。通过对各物量中心进行数据收集整理，得到物质流转结构关系（见图 3）。



（2）MFCA 方法计算结果汇总。将各物量中心投入的成本划分为材料、能源、系统和处理成本，其中，材料成本包括石灰石、页岩、黏土、铁矿石等材料，按照产品产量或主要元素含量在各物量中心间进行分配；能源成本包括电、水、煤炭、油、气等，根据耗电量、耗煤量以及对应单价在各物量中心间进行分配；系统成本包括直接人工、其他直

接费用和简介费用，根据损耗率或作业率计算系统成本的损耗，再按照热值或材料等标准在正制品和负制品之间分配；废弃物处理成本包括处理“三废”所发生的人工费、维护费等，最终处理与正制品产品生产物无直接关联，成本不需要按比例分配，直接计入负制品成本价值中的分配原则。公司水泥生产流程中各物量中心 MFCA 计算结果如表 2 所示。

表 2 A 公司水泥生产物质流成本核算结果 单位：万元

项目分类	成本项目	矿山中心	预均化中心	生料制成中心	煤粉制备中心	窑尾预分解中心	窑头烧结中心	粉磨调配中心	水泥粉磨中心
本物量中心新投入	材料成本	45 904.93	12 270.18	0	0	0	0	17 321.46	0
	能源成本	153.00	826.80	18 798.00	44 150.73	4 056.00	16 302.00	429.00	27 534.00
	系统成本	1 785.20	4 374.04	5 767.38	2 732.20	1 869.92	4 946.24	1 023.36	7 704.84
	合计	48 743.13	17 471.02	24 565.38	46 882.93	5 925.92	21 248.24	18 773.82	35 238.84
上一物量中心转入	材料成本	0	45 902.63	58 172.81	0	57 984.35	36 719.75	35 137.86	52 459.32
	能源成本	0	1 053.00	1 879.80	0	46 977.77	32 318.16	46 525.60	46 954.60
	系统成本	0	1 785.20	6 159.24	0	13 565.94	9 775.07	14 087.11	15 110.47
	合计	0	48 740.84	66 211.85	0	118 528.06	78 812.97	95 750.57	114 524.39
本物量中心总投入	材料成本	45 904.93	58 172.81	58,172.81,	0	57 984.35	36 719.75	52 459.32	52 459.32
	能源成本	1 053.00	1 879.80	20 677.80	44 150.73	51 033.77	48 620.16	46 954.60	74 488.60
	系统成本	1 785.20	6 159.24	11 926.62	2 732.20	15 435.86	14 721.31	15 110.47	22 815.31
	合计	48 743.13	66 211.85	90 777.24	46 882.93	124 453.98	100 061.21	114 524.39	149 763.23
正制品分配比率		99.99	0	99.68	99.28	63.33	95.69	0	99.89
负制品分配比率		0.01	0	0.32	0.72	36.67	4.31	0	0.11
正制品（合格）	材料成本	45 902.63	58 172.81	57 984.35	0	36 719.75	35 137.86	52 459.32	52 401.62
	能源成本	1 053.00	1 879.80	20 677.80	43 833.29	32 318.16	46 525.60	46 954.60	74 488.60
	系统成本	1 785.20	6 159.24	11 926.62	2 732.20	9 775.07	14 087.11	15 110.47	22 815.31
	合计	48 740.84	66 211.85	90 588.77	46 565.48	78 812.97	95 750.57	114 524.39	149 705.53
负制品（损失）	材料成本	2.30	0	188.47	0	21 264.60	1,581.89	0	57.71
	能源成本	0	0	0	317.44	18 715.62	2 094.56	0	0
	系统成本	0	0	0	0	5 660.79	634.19	0	0
	合计	2.30	0	0	317.44	45 641.01	4 310.64	0	57.71

（3）LCA 的外部环境损害计算。以废弃物损失对于环境的影响为媒介，进一步分析资源损失量、能源消耗量、废弃物处置、废气排放量等环境影响因素，结合相应的环境评价方法，计算资源枯竭、能源枯竭、废弃物处理环境损害等外部环境损害价

值。由于我国目前尚未有水泥业废弃物外部损害成本计算的规定和依据，借鉴日本的环境损害综合系数计算表（LIME）^[1]对 A 公司主要废弃物的外部损害成本进行计算，结果如表 3 所示。

表 3 A 水泥厂各物量中心 LCA 计算结果

单位：万元

废弃物种类	矿山中心	预均化中心	生料制成中心	煤粉制备中心	窑尾预分解中心	窑头烧结中心	粉磨调配中心	水泥粉磨中心
粉尘	5 174		419 081	72 631	60 346	6 656		111 761
CO ₂					85 618	14 079		
SO ₂					1 027	689		
NO _x					2 743	10 959		
合计	5 174		419 081	72 31	149 734	32 383		111 761

（4）生态效率计算。基于上述数据可计算得出公司各物量中心的生态效率，如表 4 所示。

表 4 A 公司物量中心的生态效率

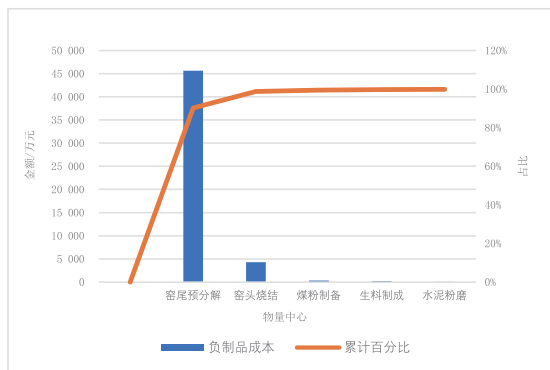
项目	矿山中心	预均化中心	生料制成中心	煤粉制备中心	窑尾预分解中心	窑头烧结中心	粉磨调配中心	水泥粉磨中心	公司整体
生态效率	9.420 3		0.216 2	0.641 1	0.526 4	2.956 8		1.339 5	0.873 7

3.2 生态效率优化诊断

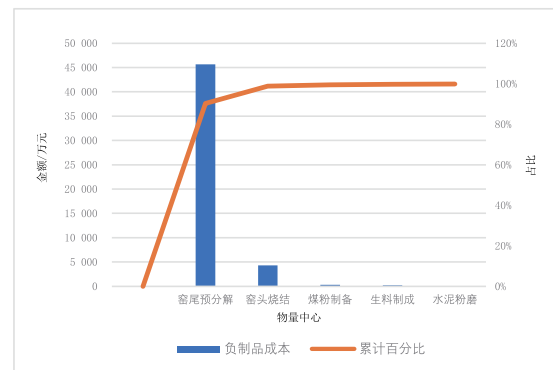
根据以上计算结果，A 公司进行 LCA-MFCA 改造的先后顺序依次为生料制成中心、窑尾预分解中心和煤粉制备中心，随后可以考虑对水泥粉磨中心的优化；此外，窑头烧结中心和矿山中心相对来说生态效率数值较高，可以暂时不列入循环经济改善的急迫清单；预均化中心和粉磨调配中心由于产生的废弃物很少，代表不仅产生的资源浪费较少，也基本不对外界环境造成污染，可以暂缓循环经济改

善和优化。

另外，各物量中心的改进方向可通过帕累托图进行分析（见图 4），为明确观察数据效果，图 4 中未列示对循环经济影响甚微的物量中心。可见，窑尾预分解中心的负制品成本占据整个生产流程中负制品成本的 90.26%，表明该物量中心为循环经济的货币化损失关键因素，应作为改进的重点；而造成废弃物外部损害占 80% 的是生料制成中心和窑尾预分解中心。



(a) 负制品



(b) 外部损害

图 4 A 公司各物量中心负制品和外部损害的帕累托分析

综上所述，A 公司应首先选取生态效率低下及内部资源损失最高、外部环境损害成本也很高的窑尾预分解物量中心作为改善点，该中心改善空间最大、效果最明显；其次，根据国家环境标准 GB 4915—2013 的要求，水泥窑中颗粒物排放标准为 20 mg/m³^[19]，A 企业生料制成中心排放达 21.93 mg/m³。由于生料制成中心的单位粉尘排放超

过标准的 10%，因此将该物量中心列为次要改善点；此外，对于内部资源损失和外部环境损害成本皆低的物量中心，效益提升潜力不大，故为最后考虑对象，不过应对此物量中心保持监控。

3.3 改进选项验证

为了验证上述提出改进方案是否能够有效提高 A 公司的生态效率，采用 LCA-MFCA 方法先按照各

方案单独进行假设分析，并模拟验证其实施效果；之后，假定所有方案都被采用，成立一个称为“组合方案”的方案，模拟该方案的组合效果。此外，进行简单的成本效益分析。

4 改造方案和效果

4.1 改造方案

基于以上评价结果，为A公司提出以下优化方案：

（1）改造方案1：在窑尾预分解中心使用袋除尘器代替原来的电除尘器。A公司采用的电除尘器在增湿塔中喷出的水量不够，导致粉尘排放超过国家标准，而袋除尘器在减少工业粉尘排放方面优于电除尘器，可以有相对稳定和高效的除尘效果，完全可以实现现行的GB4915—2013标准要求。采用袋除尘器，虽然将增加袋除尘器的一次性安装费、每年的装机能耗费、克服阻力能耗费、维修费等，但可以减少投入的电力和粉尘的排放，减少环境污染损失。

（2）改造方案2：用电石渣取代石灰石作为水泥企业的原材料。生料制成中心造成A公司最严重环境损害的主要原因在于其采用的生料原料石灰石会排放出大量的CO₂，因此考虑以污染较少的原材料代替石灰石。采用电石渣取代石灰石已被四川宜宾、新疆石河子等地的水泥企业验证了技术可行性。以回收的电石渣取代不可再生的石灰石，不仅可以降低水泥企业CO₂的排放量，还可以减少石灰石的消耗，从而保护不可再生资源；同时，电石渣作为化工企业的废弃物，本身含有一定的硫化物和磷化物成分，对环境有一定危害，因此，电石渣的再利用可以节约资源，减少对环境的破坏^[20]。

（3）改造方案3：建立低温余热系统。水泥企业低温预热技术目前比较成熟，已经有很多新建水泥企业在使用^[21]，虽然A公司目前采用了国内最为先进的新型干法水泥生产工艺和预热分解技术，但尚未将窑头和窑尾产生的余热很好地利用起来，导致了能源的浪费，因此可着手探索低温余热系统的建立和使用。

4.2 优化效果和讨论

4.2.1 袋除尘器取代电除尘器方案改进效果

在内部资源损失方面，安装袋除尘器的一次性安装费约为3300万元，使用年限为16年，按照8%的利率折算，年化成本为372.82万元；每年的装机能耗费、克服阻力能耗费、维修费合计约为270万元；而使用袋除尘器代替原来的电除尘器每年可以节省电力462.5kW，约为277.5万元。外部环境成本方面，预热分解中心每生产1t熟料仅排放0.09kg工业粉尘，由于安装袋除尘器可以减少906750kg工业粉尘，即可减少外部环境成本6098.80万元，可见，该改善方案每年仅需额外投入365.32万元进行生产，却大大降低了外部环境污染损失，因此该方案可行。

4.2.2 以电石渣取代石灰石方案改进效果

以电石渣取代石灰石的初始投资为22000万元，使用期限是10年，经测算后的年化初始成本为372.82万元。经验证，A公司原本一年要消耗石灰石14604720wt，而同等产出条件下却只需要消耗电石渣11409937.5wt，减少购买石灰石相关支出4475万元，并能减少817.86wt的CO₂排放，即减少85385万元的CO₂环境污染损失，且减少的电石渣外部损害成本为43562万元，因此利用电石渣代替石灰石生产水泥能够减少A公司外部环境污染损失共计129047万元。

4.2.3 安装低温余热系统方案改进效果

将低温余热系统安装在A公司目前正在使用的新型干法水泥生产线上，前期投资总额为3100万元，预期使用寿命为10年，年化成本为461.99万元，每年能够为企业带来2520万kW·h的电量，计算得出其所带来的内部经济效益为1260万元。该方案下，A公司每年可以减少排放2wt的CO₂，合计约减少208.8万元的外部环境污染损失；同时，余热锅炉本身具有减少工业粉尘的作用，每年能够减少25.03t的工业粉尘，约减少168.35万元的外部环境污染损失，因而安装低温余热回收系统能减少377.15万元的外部环境污染损失。

上述各方案的优化效果如表5所示。

表5 改善A公司生态效率的优化方案效益对比

单位：万元

方案	内部资源成本			外部环境损害		
	改进前	改进后	成本节约	改进前	改进后	成本节约
袋除尘	124453.98	124819.30	-365.32	149734.00	143635.20	6098.80
电石渣	58172.81	56976.46	1196.35	790764.00	661727.00	129047.00
余热系统			798.01			377.15

4.3 组合方案效果分析

基于上述结果，对各工序的内部资源成本核算、

分配进行重新划分。使用袋除尘器代替原来电除尘器受益的物量中心包含生料制成中心、煤粉制备中

心、窑尾预分解中心、水泥粉磨中心等，从电石渣取代石灰石方案受益的包括生料制成中心、煤粉制备中心、窑尾预分解中心、窑头烧结中心，从加装低温余热发电系统方案受益的包括矿山中心、预均

化中心、生料制成中心、煤粉制备中心、窑尾预分解中心和窑头烧结中心，经过在各个物量中心重新分配，可以得到经过改造后的各物量中心的成本效益，并据此计算相关生态效率（见表6）。

表6 A公司生态效率优化情况

单位：万元

物量中心	投入资源			外部损害成本			生态效率	
	改进前	改进后	效益	改进前	改进后	效益	改进前	改进后
矿山中心	48 743.13	0	48 743.13	5 174.00	0	5 174.00	9.42	
预均化中心	17 471.02	66 725.22	-49 254.20	0	0	0		
生料制成中心	24 565.38	24 137.15	428.23	419 081.00	352 532.00	66 549.00	0.22	0.26
煤粉制备中心	46 882.93	46 237.28	645.65	72 631.00	59 466.00	13 165.00	0.64	0.79
窑尾预分解中心	5 925.92	5 560.58	365.34	149 734.00	122 157.00	27 577.00	0.53	0.65
窑头烧结中心	21 248.24	20 806.91	441.33	32 383.00	21 407.00	10 976.00	2.96	4.49
粉磨调配中心	18 773.82	18 773.82	0	0	0	0		
水泥粉磨中心	35 238.84	34 979.28	259.56	111 761.00	99 689.05	12 071.95	1.34	1.50
公司整体	218 849.30	217 220.20	1 629.04	790 764.00	655 251.10	135 513.00	0.87	1.05

5 结论和展望

本研究从分析 LCA 和 MFCA 两种方法的异同点入手，寻找它们耦合的方式和程序，并结合两者优点提出一个基于 LCA-MFCA 的综合方法体系，即以 MFCA 衡量生产过程中存在的资源成本，以 LCA 方法衡量产品生命周期中所产生的外部环境损害损失。经过在 A 公司的应用及模拟验证发现，LCA-MFCA 方法在提升企业生态效率方面有明显的作用，能够找到生态效率评价中存在的缺陷，提出可能的循环经济优化方案，通过提升企业各物量中心的生态效率，不仅产生了更多利润、增加了产量，还减少了不可再生资源的耗费和环境废弃物的排放，最终减少资源和环境的双重压力。

然而，本研究的结论仅部分来源于对某实际案例的模拟验证，普适性待验证；同时，外部环境损害损失的计算基于 LIME 系数，该系数与我国国情存在较大的差距，且外部环境损害难以实际内生化为企业的经济效益，导致企业缺少内生动力来推进生态效率的优化。因此，今后需进一步研究如何推动外部环境损害内生化的，以提高企业优化生态效率的积极性。

注释：

1) 外部环境损害成本均基于各废弃物的 LIME 值计算得出。

参考文献：

- [1] SCHALTEGGER S, STURM A. Ökologische rationalität: ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten [J]. Die Unternehmung, 1990,44(4): 273-290.
- [2] WBCSD. Eco-efficiency: creating more value with less impact [R]. Geneva: WBCSD, 2000.
- [3] ISO. Environmental management: ecoefficiency assessment of

- product systems, principles, requirements and guidelines: ISO 14045:2012 [S]. Geneva: ISO, 2012:3-6.
- [4] DEWULF W, DUFLOU J, ANDER A. Toward a sectorwide design for environment support system for the rail industry [J]. Environmental management, 2004,34(2):181-190.
- [5] OREA L, WALL A. A parametric approach to estimating eco-efficiency [J]. Journal of Agricultural Economics, 2017,68(3):901-907.
- [6] KOUNETAS K E, POLEMIS M L, TZEREMES N G. Measurement of eco-efficiency and convergence: evidence from a non-parametric frontier analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 291(1):365-378.
- [7] 肖序, 刘三红. 基于“元素流-价值流”分析的环境管理会计研究 [J]. 会计研究, 2014(3):79-87,96.
- [8] 王博. 物质流成本会计(MFCA)国际标准系列(ISO 14051, ISO 14052, ISO 14053)的发展与意义 [J]. 标准科学, 2022(9):88-92.
- [9] 肖序, 李成, 曾辉祥. MFCA 的生命周期视角扩展: 机理、方法与案例 [J]. 系统工程理论与实践, 2016,36(12):3164-3174.
- [10] ISO. Environmental management: material flow cost accounting: general framework: ISO 14051:2011 [S]. Berlin, 2011:1-13.
- [11] ISO. Environmental management: environmental management: material flow cost accounting: guidance for practical implementation in a supply chain: ISO 14052:2017 [S]. Berlin, ISO, 2017:1-7.
- [12] ISO. Environmental management: Material flow cost accounting: Guidance for phased implementation in organizations: ISO 14052:2021 [S]. Berlin: ISO, 2021:1-10.
- [13] 肖序, 曾辉祥, 李世辉. 环境管理会计“物质流-价值流-组织”三维模型研究 [J]. 会计研究, 2017(1):15-22,95.
- [14] SCHMIDT M, NAKAJIMA M. Material flow cost accounting as an approach to improve resource efficiency in manufacturing companies [J]. Resources, 2013,2(4):358-369.
- [15] BESNE A G, LUNA D, COBOS A, et al. A methodological framework of eco-efficiency based on fuzzy logic and life cycle assessment applied to a Mexican SME [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2018, 68:38-48.
- [16] EGILMEZ G, GUMUS S, KUCUKVAR M, et al. A fuzzy data envelopment analysis framework for dealing with uncertainty impacts of input-output life cycle assessment models on eco-efficiency assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 129:622-636.

- [17] JURAN J M. Quality control handbook [M] .New York: McGraw-Hill ,1951:34-42.
- [18] 朱鹏 . 资源价值流转会计视角的污染治理思路 : 以水泥行业协同消纳生活垃圾为例 [J] . 会计研究 ,2019(12):85-91.
- [19] 环境保护部 , 国家质量监督检验检疫总局 . GB4915—2013. 水泥工业大气污染物排放标准 [S] .2013:3-6.
- [20] 魏宁 , 刘胜男 , 魏凤 , 等 . 中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估 [J/OL] . 环境科学 :1-12(2022-10-28) [2023-09-29] .DOI:10.13227/j.hjkk.202210287.
- [21] MARTÍNEZ-MARTÍNEZ S, PÉREZ-VILLAREJO L, ELICHE-QUESADA D, et al. New types and dosages for the manufacture of low-energy cements from raw materials and industrial waste under the principles of the circular economy and low-carbon economy[J]. Materials, 2023,16(2): 802-813.
- 作者简介：**刘三红（1980—），女，湖南邵阳人，副教授，博士，主要研究方向为环境管理会计、资源价值流；梁雯（1987—），女，浙江绍兴人，讲师，博士，主要研究方向为绿色并购与企业创新、循环经济价值流；张伟（1982—），通信作者，女，河南正阳人，讲师，硕士，主要研究方向为循环经济、废弃物资源化。