

固废替代原料生产水泥熟料的生命周期多维评价

沈鸿海, 郑 焱, 刘 宇, 崔素萍

(北京工业大学, 材料循环低碳再生全国重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 基于电石渣、电解锰渣、煤矸石、粉煤灰和污泥 5 种固废替代原料生产硅酸盐水泥熟料的技术情景, 本工作构建了适用于固废资源化利用效果评估与方案设计的多维评价体系, 系统分析了固废资源化利用对水泥熟料碳排、资源和环境表现的影响。结果表明, 电石渣替代情景在碳减排和资源节约方面表现最为显著, 煤矸石替代情景在能源节约方面表现最佳, 粉煤灰和污泥替代情景则在环境效益方面贡献显著。同时, 固废资源化过程因预处理工艺、含水率较高、有害物质含量较高等因素也会造成一些负面影响。基于多维评价方法可有效辨识固废资源化过程的潜在效益与负面影响, 通过权重赋值开展多目标综合决策, 科学指导工艺研发与路径遴选, 进一步提升固废资源化的综合效益。

关键词: 固废替代原料; 低碳水泥熟料; 多维评价; 生命周期

中图分类号: TU525 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)05-1625-09

网络出版时间: 2026-03-13



全球气候变暖与极端天气频发是 21 世纪人类社会面临的重大挑战, 推动绿色低碳转型已成为国际共识^[1]; 中国提出了“碳达峰、碳中和”战略目标, 并将资源高效利用列为实现“双碳”目标的关键路径之一^[2]。水泥制造业的碳排放占全球总量的 5%~10%^[3], 中国作为世界上最大的水泥生产国, 年碳排放量超过 12 亿 t, 减排压力尤为突出^[4]; 熟料生产阶段碳排放约占水泥全生命周期总量的 87%~94%^[5], 是实现行业减排的关键环节。

近年来, 水泥行业的固废资源化利用技术逐步成熟, 通过替代天然矿物和化石燃料, 可有效降低碳酸盐分解与燃料燃烧排放, 被视为是支撑行业温室气体减排目标实现的重要技术路径^[6]。目前, 中国水泥行业年综合利用固废总量约 8 亿 t^[7], 主要作为混合材掺合使用, 而在熟料生产阶段固废替代原燃料的比例仍偏低。《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》明确要求, 到 2030 年大宗固废年利用量达到 45 亿 t^[8], 相关机构预测资源循环技术对中国碳减排的综合贡献率将超过 30%^[9]。固废在水泥行业的资源化应用仍具显著增量空间。

已有学者针对固废在熟料生产环节的资源化利用效果开展研究。光文涛等^[10]基于碳足迹方法的研究表明, 电石渣替代熟料在煅烧阶段可减少约 130 kg 二氧化碳排放当量(CO₂ eq)的碳排放。甘万贵等^[11]证实钢渣替代 3.5%(质量分数)原料生产水泥熟料可实现 23.05 kg CO₂ eq 的减排效益。这些研究凸显固废替代在熟料生产阶段的直接减排效益。Cui 等^[12]基于生命周期评价的研究发现, 相较于天然矿物熟料, 煤矸石替代熟料展现出更优的综合节能效果。邓恺等^[13]也指出, 采用污泥焚烧灰渣生产熟料, 能够使天然矿物资源消耗下降约 3.6%, 展现出较好的节材效果。然而, 固废替代熟料的过程亦存在一定的负面影响, 可能会存在环境负荷转移的问题。Liu 等^[14]研究发现, 在电石渣替代熟料的情景下, SO₂、NO_x 和颗粒物(PM)的排放量分别增加 14.8%、12.2%和 11.7%。唐子涵等^[15]亦指出, 煤矸石替代原燃料生产熟料会导致约 6%的 SO₂ 排放增加。

从研究趋势上来看, 目前针对水泥熟料固废资源化利用过程的节能、节材、减碳等单一维度的研究较为成熟, 但考虑到固废资源化利用过程可能发

收稿日期: 2025-09-29。 修订日期: 2025-10-26。

基金项目: 新材料重大专项(2024ZD0607600)。

第一作者: 沈鸿海(1996—), 男, 博士研究生。

通信作者: 崔素萍(1964—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2025-09-29. Revised date: 2025-10-26.

First author: SHEN Honghai (1996—), male, Doctoral candidate.

E-mail: shenhonghai199@163.com

Correspondent author: CUI Suping (1964—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: cuisuping@bjut.edu.cn

生环境效益与负面影响并存的情况，建立基于多维指标的综合评价体系具有意义。本工作基于产品碳足迹量化、生命周期评价等标准模型，构建涵盖碳排、资源、环境 3 项一级指标及 12 项二级指标的多维评价指标体系，设定适用于固废资源化综合评估的系统边界，并选取多种典型固废利用情景，跨维度系统分析不同固废替代情景的绿色化效益与负面影响，为水泥行业低碳转型提供理论支持与数据支撑。

1 方法

1.1 情景设置

本工作选取 5 种在水泥熟料生产中资源化利用

的典型固废构建评价情景，通过与基准情景的对比分析，系统评估固废资源化利用在碳排放、资源消耗及环境影响方面的潜在效益与负面影响。其中，基准情景设定为：水泥熟料生产的全部原料来源于天然矿物，包括石灰石、粘土、砂岩和铁矿石等，情景 1~情景 5 涉及的固废(电石渣、电解锰渣、煤矸石等)通过填埋、焚烧等传统方式进行处置。具体的替代情景如表 1 所示。

本工作优先选取水泥熟料生产中已广泛开展资源化利用的固废类型，在确保熟料抗压强度、凝结时间、安定性等性能指标符合 GB/T 21372—2008《硅酸盐水泥熟料》标准要求的基础上，构建各类固废最大可行掺量的替代情景，如表 1 所示。

表 1 固废替代情景
Table 1 Solid waste substitution scenario

Scenario	Waste type	Substituted material	Mass fraction	Process description
1	Carbide slag	Limestone	52%	The carbide slag is first dewatered mechanically (reducing the moisture content to 35%–40%), and then dried in a coal-drying unit until the moisture content is below 15%. This dried slag then replaces some of the limestone and is co-ground with the other raw materials prior to clinker burning.
2	Manganese slag	Limestone	17%	The slag is ball-milled and alkali activators, in the form of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and anhydrous Na_2SO_4 , are added to enhance reactivity. The pretreated slag then replaces some of the limestone in the clinker raw meal
3	Coal gangue	Sandstone; coal	9%	Coal gangue is used without pre-treatment, being blended directly into the raw mix and co-ground with the other materials for clinker production
4	Fly ash	Clay; sandstone	4%	Dry fly ash is used directly as a raw material in the production of clinker and is co-ground with the other raw materials
5	Sewage sludge	Clay	20%	Sludge (~80% moisture) is pre-dried by hot gases from the precalciner (860–900 °C) to ~35% moisture; the dried sludge is then used as a raw material for clinker production

1.2 评价范围

本工作以生产 1 t 水泥熟料(抗压强度为 52.5 MPa, 符合 GB/T 21372—2008 要求)作为评价的功能单位。评价的系统边界涵盖从资源开采至水泥熟料产出的生命周期过程，包括以下主要环节：原料生产、固废预处理、运输过程、熟料生产过程，以及避免的固废常规处置。系统边界如图 1 所示。

1.3 多维评价指标体系与计算方法

本工作综合考虑碳排、资源、环境 3 方面构建多维评价指标体系，如表 2 所示。综合碳排指标评估目标情景碳排放的变化量；综合环境指标评估目标情景综合环境要素的变化量；综合资源指标评估目标情景综合资源要素的变化量。其中，“变化量”是指目标情景相对于基准情景各类指标值的改变量。

基于产品碳足迹计算方法^[16–17]，考虑变化量因

素，构建各碳排指标计算方法：

$$\Delta\text{CFP} = \sum_x \Delta\text{CFP}_x = \sum_x \sum_i (\Delta A_i^x \cdot \text{CEF}_i) \quad (1)$$

式中： ΔCFP 为综合碳排指标的评价值； ΔCFP_x 为第 x 种二级碳排指标的评价值； ΔA_i^x 为第 x 种二级碳排指标的评价范围内第 i 项活动的变化量(原燃料用量、运输量、处置量、石灰石分解量等)； CEF_i 为第 i 项活动的碳排放因子。

基于 ReCiPe2016 中间点和终点模型^[18]构建各资源指标计算方法：

$$\Delta\text{RIS} = \sum (\Delta\text{RF}_i \cdot \text{Qm}_i) = \sum_i \left(\left(\sum_j \Delta R_j \cdot \text{CFm}_{j,i} \right) \cdot \text{Qm}_i \right) \quad (2)$$

式中： ΔRIS 为综合资源指标的评价值； ΔRF_i 为第 i 种二级资源指标的评价值； Qm_i 为终点转换因子； ΔR_j 为生命周期清单中第 j 种矿产或能源的变化量；

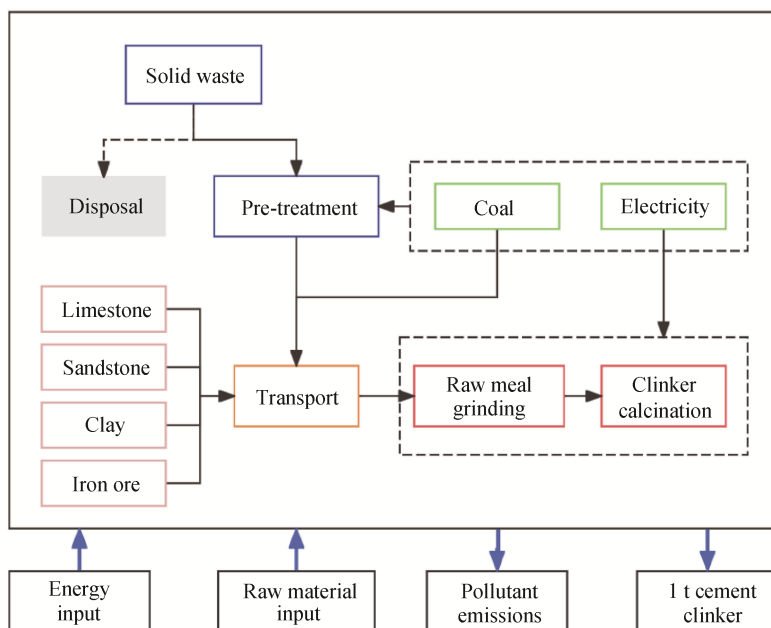


图 1 多维评价系统边界图

Fig. 1 Multidimensional assessment system boundary

表 2 多维评价指标体系

Table 2 Multidimensional assessment indicator system

First-level indicator		Second-level indicator	
ΔCFP	Comprehensive Carbon Emissions Indicator	ΔCFP_{acp}	Change in carbon emissions from raw material production
		ΔCFP_{tra}	Change in carbon emissions from transportation
		ΔCFP_{pro}	Change in carbon emissions from production
		ΔCFP_{dis}	Change in carbon emissions from avoided conventional disposal
ΔRIS	Comprehensive Resource Indicator	ΔFFP	Change in fossil resource consumption
		ΔSOP	Change in mineral resource consumption
		$\Delta PMFP$	Change in particulate matter formation
		$\Delta HOFp$	Change in photochemical ozone formation – human health
ΔEIS	Comprehensive Environmental Indicator	$\Delta EOFp$	Change in photochemical ozone formation – ecosystems
		ΔTAP	Change in terrestrial acidification
		$\Delta HTPc$	Change in human toxicity(cancer)
		$\Delta HTPnc$	Change in human toxicity (non-cancer)

$CFm_{j,1}$ 为第 j 种矿产或能源对第 1 种二级资源指标的特征化因子。

基于 ReCiPe2016 中的归一化加权方法^[19]构建各环境指标计算方法：

$$\Delta EIS = \sum_k \left(\frac{\Delta EF_k}{N_k} \cdot W_k \right) = \sum_k \left(\frac{\sum_j (\Delta P_j \cdot CFm_{j,k})}{N_k} \cdot W_k \right) \quad (3)$$

式中： ΔEIS 为综合环境指标的评价值； ΔEF_k 为第 k 种二级环境指标的评价值； N_k 为归一化因子； W_k 为权重，采用等权重因子； ΔP_j 为生命周期清单中第 j 种污染物的变化量； $CFm_{j,k}$ 为第 j 种污染物对

第 k 种二级环境指标的特征化因子。

基于标准化与权重赋值的方法，将不同维度的一级指标在相同的量纲下进行比较，具体计算方法如下：

$$Z_{s,m} = \frac{\max x_m - x_{s,m}}{\max x_m - \min x_m} \quad (4)$$

式中： $Z_{s,m}$ 为 s 情景在 m 类一级指标的标准化值， $Z_{s,m}=1$ 表示最优， $Z_{s,m}=0$ 为最差； $\max x_m$ 和 $\min x_m$ 分别为 m 类一级指标的最大值和最小值。

$$S_s = \sum_m w_m \cdot Z_{s,m}, \sum_m w_m = 1 \quad (5)$$

式中： S_s 为 s 情景的跨维度综合评估结果， w_m 为 m

类一级指标的权重。

1.4 数据获取

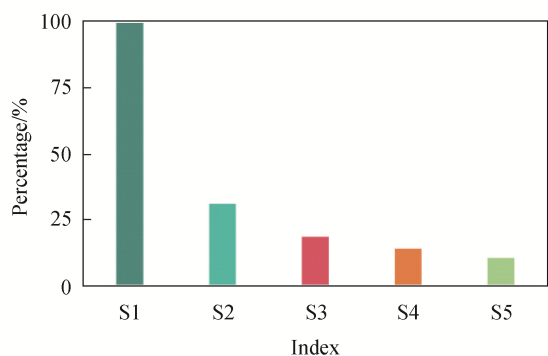
各情景水泥熟料生产数据均来源于中国典型水泥企业,选取的典型企业具有相近的生产规模和技术水平。基准情景及固废替代情景下生产水泥熟料的主要资源、能源消耗和运输量如表 3 所示。

表 3 各情景水泥熟料生产数据

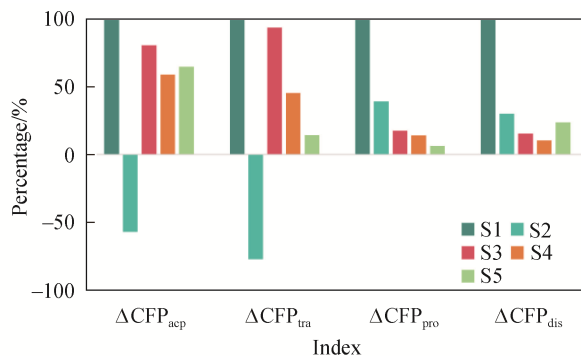
Table 3 Cement clinker production data for each scenario

Process	Unit	Baseline	S1	S2	S3	S4	S5
Limestone	kg/t	1280	512	1040	1210	1220	1214
Sandstone	kg/t	71	44	37		21	29
Iron ore	kg/t	42			35	34	33
Clay	kg/t	56	115	49	137	108	
Carbide slag	kg/t		769				
Other slag	kg/t		38	80			
Manganese slag	kg/t			230			
Ca(OH) ₂	kg/t			0.94			
Na ₂ SO ₄	kg/t			0.63			
Coal gangue	kg/t				117		
Fly ash	kg/t					78.9	
Sewage sludge	kg/t						330
Bauxite	kg/t						34
Transportation	t·km/t	159	207	216	130	144	154
Coal	kg/t	126	143	120	103	122	131
Electricity	kW·h/t	40.8	39.7	55.0	39.5	38.0	39.2

背景数据来自北京工业大学开发生命周期基础数据库(Sino-center)^[20]与欧洲 Ecoinvent 数据库^[21],



(a) Assessment of first-level carbon emission indicators



(b) Assessment of second-level carbon emission indicators

图 2 碳排指标评价结果

Fig. 2 Assessment results of carbon emission indicators

二级碳排指标评价结果如图 2b 所示(将情景 1 的各二级碳排指标设为 100%,其他情景展示与情景 1 的相对值)。在原料生产过程中,情景 1、情景 3、情景 4 和情景 5 通过固废替代天然矿石,减少矿石开采与破碎过程的碳排放,呈现一定的碳

减排效益,但情景 2 由于电解锰渣预处理需额外消耗 Ca(OH)₂ 和无水 Na₂SO₄ 等化学原料,反而增加 9.8 kg CO₂ eq 的碳排放。在运输过程中,各情景间的碳排放差异和原料生产过程趋势相似,但整体变化幅度较小,对综合碳排放的影响相对有限。在熟

数据源的详细信息如下。

1) 能源生产:能源生产的生命周期清单来自 Sino-center 数据库,数据基于国家统计数据计算,反映中国能源生产的平均水平。

2) 材料生产:石灰石、粘土和砂岩开采清单来自 Sino-center 数据库,代表中国区域的平均水平;铁矿石开采清单来自 Ecoinvent 数据库。

3) 运输过程:公路运输的生命周期清单来自 Ecoinvent 数据库。

4) 废弃处置:填埋和焚烧的废弃处置清单数据来源于 Ecoinvent 数据库。

2 结果与讨论

2.1 固废资源化利用的减碳效果评价

5 种情景的一级碳排指标评价结果如图 2a 所示(将情景 1 的综合碳排指标设为 100%,其他情景展示与情景 1 的相对值)。结果显示,所有替代情景均实现不同程度的碳减排。其中,情景 1 的 ΔCFP 指标为-351.3 kg CO₂ eq,相较于基准情景减排幅度达 35.2%,碳减排效果最为显著,其后依次为电解锰渣、煤矸石、粉煤灰和污泥替代情景,综合碳减排量分别为 108.6、64.7、48.9 kg 和 38.9 kg CO₂ eq。从过程贡献看,熟料生产过程是决定综合减排效益的关键环节,其在 5 种情景中的贡献占比分别为 77%、98%、73%、77%和 56%,相比之下,原料生产、运输及避免常规处置等过程的碳排放变化量相对较小,对综合碳减排的贡献有限。

料生产过程中,情景1和情景2分别可实现 217.2 kg 和 101.1 kg CO₂ eq 的减排量,碳减排效益显著,主要机制在于固废替代石灰石有效降低石灰石煅烧分解所产生的碳排放(通常占总排放量的 50%以上)。但需注意的是,电石渣和电解锰渣的预处理环节会增加能耗,导致能源生产和燃料燃烧的碳排放增加,部分抵消其碳减排效果。情景3通过煤矸石替代煤炭,可降低燃料燃烧阶段的排放,但受限于其含钙量不足,难以实现对石灰石的实质性替代,在工艺过程中的减排贡献有限。情景4依靠粉煤灰改善烧成特性,使煅烧热降低约 3%,减排作用相对较弱,仅可实现 37.5 kg CO₂ eq 的碳减排效果。情景5则因污泥高含水率需增加煤炭消耗,燃料燃烧过程碳排放增加 4%,导致其生产过程碳减排效益最弱。在避免废弃处置过程中,各情景均因避免固废填埋或焚烧所产生的碳排放,产生一定的额外减排效益,情景1和情景2由于固废替代率较高,在此过程分别避免 72.5 kg 和 21.7 kg CO₂ eq 的碳排放负荷,但

其余情景在此过程的减排贡献程度相较熟料生产过程并不显著。

2.2 固废资源化利用的资源效益评价

在资源维度下,各情景的一级资源指标评价结果如图 3a 所示(情景1的综合资源指标设为 100%,其他情景展示与情景1的相对值)。结果表明,5种情景均实现资源消耗的降低。具体来看,情景1的综合资源指标相较于基准情景减少 19.4%的综合资源消耗,展现出最显著的资源节约效益,其后依次为煤矸石、粉煤灰、污泥和电解锰渣替代情景。与 ΔCFP 指标不同, ΔRIS 指标受“避免常规废弃物处置”的影响程度较高,若仅考虑水泥熟料生产过程中的资源节约效益,情景3的表现最为显著。造成差异的主要原因在于,情景1中电石渣的替代掺量在5种情景中最高(41.5%),纳入避免常规处置情况下,情景1通过避免 0.769 t 固废填埋显著降低综合资源消耗量,从而显著提升情景1在资源维度下的综合表现。

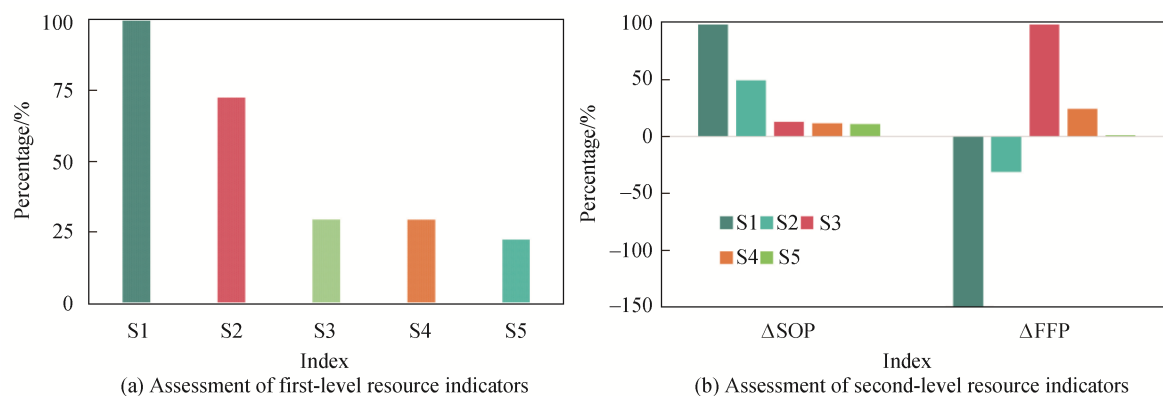


图3 资源指标评价结果

Fig. 3 Assessment results of resource indicators

二级资源指标评价结果如图 3b 所示(情景1的 ΔSOP 指标设为 100%,情景3的 ΔFFP 指标设为 100%,其他情景展示与情景1或情景3的相对值)。在 ΔSOP 指标的单项分析中,情景1的节材效益最为显著,相较基准情景减少 42.9%的矿产资源消耗,其次为电解锰渣替代情景,这2种情景的优势主要源于较高的固废掺入比例,从而显著降低天然矿物原料的消耗,并在避免处置方面带来更显著的节材效益。然而,情景5中污泥的替代掺量可达 20%,其节材效果却相对有限,主要原因在于,为满足熟料生产对矿物组成的基本要求,情景5需额外引入一定量的铝矾土,而铝矾土的 SOP 特征化因子显著高于石灰石、粘土等常规原料,导致矿产资源消耗指标上升,部分抵消污泥替代所带来的节材潜力。

从化石能源消耗的角度来看,情景3展现出最优的节能效益,相较基准情景,化石资源消耗降低 18.9%,主要归因于煤矸石替代约 20%的煤炭,显著降低单位熟料生产过程中的燃煤强度。相比之下,情景1呈现出明显的能源负荷, ΔFFP 指标较基准情景增长 27.2%,主要源于电石渣在预处理环节的高能源需求(每吨电石渣需消耗约 50 kg 煤炭和 39 kW·h 电力),尽管该情景通过避免电石渣填埋处置具有一定节能效果,但其预处理环节所需的高能耗无法被完全抵消,导致其总体化石能源消耗显著增加。情景2的能耗表现也未优于基准情景,其 ΔFFP 指标增加 7.5%,主要源于电解锰渣投入使用前需进行高耗电的预处理操作(每吨处理电耗高达 115 kW·h),进而增加该情景的化石能源消耗负荷。

ΔPMFP 、 ΔEOFP 、 ΔTAP)等负面影响;情景 2 的综合碳减排与环境效益较为明显,但预处理的重金属污染物排放与高能耗严重制约综合效益,需突破技术瓶颈才能释放其资源化的优势;情景 3 的综合碳减排效益不及情景 1 和情景 2,但无明显环境负面影响,且在化石能源节约上表现显著,属于“低风险、稳效益”情景;情景 4 的减排、节材、节能和环保效果均相对有限,但各指标均未产生明显负面影响;情景 5 仅在光化学烟雾控制上有显著优势,碳减排、资源节约效果均最为薄弱,且需额外补充原燃料,适合于光化学烟雾影响继续改善的场景。

$\Delta\text{CFP}_{\text{acp}}$	✓✓✓	×××	✓✓✓	✓✓	✓✓✓
$\Delta\text{CFP}_{\text{tra}}$	✓✓	××	✓✓	✓	○
$\Delta\text{CFP}_{\text{pro}}$	✓✓✓	✓✓	✓	✓	✓
$\Delta\text{CFP}_{\text{dis}}$	✓✓	✓	○	○	○
ΔSOP	✓✓✓	✓✓	✓	✓	✓
ΔFFP	××	×	✓✓	✓	○
ΔHOFp	××	×	✓	✓	✓✓
ΔPMFP	×××	×	✓✓	✓	○
ΔEOFP	××	×	✓	✓	✓✓
ΔTAP	×××	○	✓	✓	○
ΔHTPc	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓
ΔHTPnc	✓✓✓	✓	✓✓	✓	✓
ΔCFP	✓✓✓	✓✓	✓	✓	✓
ΔRIS	✓✓	✓	✓✓	✓	✓
ΔEIS	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓
	S1	S2	S3	S4	S5

图 5 多维指标评价结果

Fig. 5 Assessment results of multidimensional indicators

2.5 固废资源化利用的综合决策

在多维评价基础上,面向固废资源化的实际应用需求,对碳排、资源与环境 3 类一级指标赋予差异化权重,并通过标准化与加权将多维评价结果转化为可量化、可比较的单一综合评分。除等权重外,本工作设置 3 种双维度优先的权重方案,如表 4 所示,进一步量化不同决策导向下各情景的综合效益,将决策偏好从“单维度最优”转化为“多目标并重”,符合企业在减碳、节能、节材与环保之间的真实权衡。

表 4 权重设置

Table 4 Weight setting for each scenario

No.	Scheme	ΔCFP	ΔRIS	ΔEIS
1	Equal weights	0.33	0.33	0.33
2	Carbon–resource dual priority	0.45	0.45	0.10
3	Carbon–environmental dual priority	0.45	0.10	0.45
4	Resource–environmental dual priority	0.10	0.45	0.45

5 种情景的综合指标评价结果如图 6 所示,根据评估结果,无论采用等权重还是 3 种双维度优先权重设置,情景 1 均取得最高综合评分。在“碳排–资源优先”与“资源–环境优先”权重下,情景 3 的综合评分显著高于情景 2,位列第二;而在“碳排–环境优先”权重下,情景 2 综合评分升至 0.17,超过情景 3。相较之下,情景 4 与情景 5 在 4 种权重设置下综合评分均较低,仅在资源权重较高时略有改善。由此可知,面向“减碳+节能节材”或“节能节材+环保”的目标时,应以情景 1 为主要路径、情景 3 为优先补强;当策略转向“减碳+环保”时,情景 2 相对优势提升。

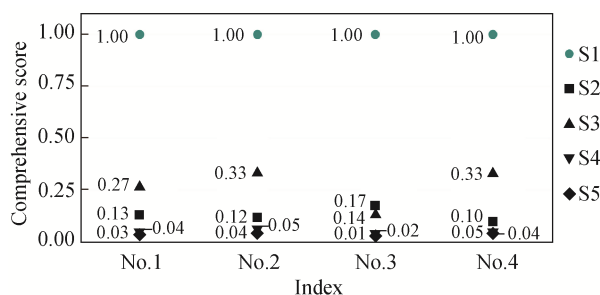


图 6 综合指标评价结果

Fig. 6 Assessment results of comprehensive indicator

本工作系统分析了 5 种典型固废替代原料的多维效益,并基于不同价值取向设置权重组合,开展综合决策,构建的多维评价与综合决策方法为固废资源化评估与技术遴选提供了有效范式;后续可在拓展情景覆盖与优化赋权科学性方面深化研究,进一步助力水泥行业绿色低碳转型与可持续发展。一方面,受固废类型多样与协同替代方式差异影响,单篇研究难以覆盖实际生产中全部可行组合,可能导致部分具有潜在价值的情景未被纳入评估,后续可在既有框架下拓展固废类型并丰富协同替代组合,以更全面地挖掘综合效益。另一方面,权重作为综合决策的核心参数,存在多种设定路径,其不同取值会显著影响综合评分排序与决策导向,未来宜探索熵权法等客观赋权与主观赋权的融合策略,降低因加权步骤带来的主观性。

3 结论

1) 碳排维度中,所有情景均可实现碳减排,其中情景 1 的减排效果最显著,较基准情景降低 35.2%;而情景 2 因预处理额外消耗化学原料,在原料生产环节增排 9.8 kg CO₂ eq;情景 5 因污泥高含水率导致燃料燃烧碳排放增加 4%。

2) 资源维度中, 情景 1 在综合资源节约(降低 19.4%)与节材方面表现最优, 然而其预处理高能耗使化石能源消耗较基准情景增加 27.2%; 相比之下, 情景 3 的节能效果最为显著, 化石资源消耗下降 18.9%。

3) 环境维度中, 情景 1 综合环境影响改善幅度最大(下降 84.7%), ΔHTPc 和 ΔHTPnc 指标表现优异, 但预处理煤炭消耗增加, 引发 NO_x 、 PM 、 SO_2 等污染物排放, 产生环境负面影响; 情景 2 预处理过程中化学原料生产导致 Hg 排放增加, 抵消部分资源化的环境效益。

4) 多维度视角下, 情景 1 在综合碳减排、节材及环境改善方面表现最优; 情景 2 的高能耗预处理环节严重制约其节能效益; 情景 3 无明显环境负面影响且化石能源节约突出; 情景 4 各效益有限但无明显负面影响; 情景 5 仅在光化学烟雾控制上有优势。

5) 综合评价中, 情景 1 在等权重及 3 种双维度优先方案中均稳居首位, 是综合效益最优的核心路径; 情景 3 在“碳排–资源优先”与“资源–环境优先”导向下适合作为优先补强方案; 情景 2 可作为“碳排–环境优先”目标导向下的备选方案。

参考文献:

- [1] ZHAO W J. Extreme weather and climate events in China under changing climate[J]. *Natl Sci Rev*, 2020, 7(5): 938–943.
- [2] 黄诗冰, 廖宜顺. 加强固废资源化利用研究 促进绿色低碳发展转型[J]. *武汉科技大学学报*, 2025, 48(2): 79–80.
HUANG Shibing, LIAO Yishun. *J Wuhan Univ Sci Technol*, 2025, 48(2): 79–80.
- [3] HOSSAIN M U, POON C S, LO I M C, et al. Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study[J]. *Resour Conserv Recycl*, 2017, 120: 199–208.
- [4] PING L, ZHAO G, LIN X H, et al. Feasibility and carbon footprint analysis of lime-dried sludge for cement production[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2500.
- [5] CLARK G, DAVIS M, KUMAR A. Multi-measure pathways for achieving carbon-neutral cement production[J]. *Sustain Prod Consum*, 2025, 57: 355–374.
- [6] GAO S Y, LIU X Y, ZHU L, et al. Evaluating the beneficial use of solid waste in clinker production: A Multi-Criterion Decision-Making Approach[J]. *J Environ Chem Eng*, 2025, 13(5): 117470.
- [7] 国家发展改革委. 水泥行业节能降碳专项行动计划[EB/OL]. [2025–09–26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6956305.htm.
- [8] 中共中央, 国务院. 中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见[EB/OL]. [2024–07–31]. https://www.gov.cn/zhengce/202408/content_6967663.htm.
- [9] 中国循环经济协会. 循环经济助力碳达峰研究报告(2023)[EB/OL]. [2025–09–29]. <https://www.chinacace.org/tactic/view id=6>.
- [10] 光文涛, 隋晓萌, 王鹏刚, 等. 采用固废制备的高贝利特硫铝酸盐水泥碳足迹核算与分析[J]. *青岛理工大学学报*, 2022, 43(4): 34–40.
GUANG Wentao, SUI Xiaomeng, WANG Penggang, et al. *J Qingdao Univ Technol*, 2022, 43(4): 34–40.
- [11] 甘万贵, 赵青林. 钢渣烧制硅酸盐水泥熟料的减碳效果分析[J]. *建材世界*, 2022, 43(6): 121–125.
GAN Wangui, ZHAO Qinglin. *World Build Mater*, 2022, 43(6): 121–125.
- [12] CUI J P, LIU Y, WANG Z H, et al. Life cycle assessment of cement clinker production using coal gangue as alternative raw material and fuel[J]. *Mater Sci Forum*, 2015, 814: 435–440.
- [13] 邓恺, 李华兵, 袁淑婷, 等. 污泥焚烧灰渣在水泥中资源化利用的环境影响评价[J]. *硅酸盐通报*, 2025, 44(4): 1346–1356.
DENG Kai, LI Huabing, YUAN Shuting, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2025, 44(4): 1346–1356.
- [14] LIU Y, ZHENG Y, WANG Y J, et al. Life cycle assessment of beneficial use of calcium carbide sludge in cement clinker production: A case study in China[J]. *J Clean Prod*, 2023, 418: 138003.
- [15] 唐子涵, 刘宇, 郑焱, 等. 利用煤矸石替代原燃料制造水泥熟料的减污降碳潜力分析[J]. *中国建材科技*, 2025, 34(1): 34–37.
TANG Zihan, LIU Yu, ZHENG Yan, et al. *China Build Mater Sci Technol*, 2025, 34(1): 34–37.
- [16] 赵金兰, 陈素屏, 杨鑫, 等. 水泥熟料产品生产阶段碳足迹评价研究[J]. *新世纪水泥导报*, 2025, 31(3): 1–6.
ZHAO Jinlan, CHEN SuPing, YANG Xin, et al. *Cem Guide New Epoch*, 2025, 31(3): 1–6.
- [17] KARPAN B, ABDUL RAMAN A A, RAHIM R, et al. Carbon footprint evaluation of industrial wastes based solid fuel in the context of its use in a cement plant[J]. *Waste Biomass Valorization*, 2022, 13(8): 3723–3735.
- [18] 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[J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2017, 22(2): 138–147.
- [19] ROESCH A, SALA S, JUNGBLUTH N. Normalization and weighting: The open challenge in LCA[J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2020, 25(9): 1859–1865.
- [20] Beijing University of Technology. Material Life Cycle Assessment Database[EB/OL]. [2025–09–26]. <http://cnmlca.bjut.edu.cn/database>.
- [21] Ecoinvent Association. Ecoinvent database v3.11[EB/OL]. [2025–09–26]. <https://www.ecoinvent.org>.

作者贡献声明:

沈鸿海: 模型建立、数据分析、论文撰写
郑焱: 数据调研、数据清洗、图表绘制
刘宇: 数据校验、论文撰写
崔素萍: 方案制定、模型优化

Multidimensional Life-Cycle Assessment of Cement Clinker Production Using Solid-Waste Alternative Raw Materials

SHEN Honghai, ZHENG Yan, LIU Yu, CUI Suping

(State Key Laboratory of Materials Low-carbon Recycling, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Extend Abstract

Introduction The introduction of carbon peaking and carbon neutrality targets has made a green, low-carbon transition the prevailing trend in the cement manufacturing industry. Solid-waste valorisation, which involves substituting natural minerals and fossil fuels with suitable solid waste, can effectively reduce emissions from carbonate decomposition and fuel combustion. It is therefore regarded as a key technological pathway for achieving the carbon reduction goals. The existing studies on single dimensions such as energy or material saving, or carbon mitigation in clinker production using solid waste are relatively well-developed. However, valorisation can generate both environmental benefits and drawbacks, there is a clear need for a comprehensive assessment framework based on multiple indicators that can capture trade-offs across impact categories, rather than drawing conclusions from a single metric.

Methods A multidimensional assessment framework was developed based on standard product carbon footprint and life-cycle assessment models. This framework could comprise three primary indicators, *i.e.*, carbon, resources and environment and twelve secondary indicators, enabling the structured and transparent evaluation of benefits as well as potential burden shifting. A consistent system boundary was defined to cover the entire clinker production value chain, including solid waste inputs, raw material production, waste pre-treatment, transportation, clinker production and credits for avoiding conventional disposal methods (landfilling or incineration). Within this boundary, five substitution scenarios involving the use of solid waste were constructed and benchmarked against a mineral-only baseline, *i.e.*, carbide slag (S1), manganese slag (S2), coal gangue (S3), fly ash (S4) and sewage sludge (S5). We then systematically quantified the potential benefits and burdens of solid waste utilisation in terms of carbon emissions, resource consumption and environmental impacts. This could provide a decision-relevant evidence to support the cement industry's transition to a low-carbon economy.

Results and discussion In terms of carbon emissions, all scenarios achieve net reductions, albeit with significant variation in magnitude. Scenario 1 demonstrates the most significant mitigation, reducing emissions by 35.2%, compared to the baseline, resulting in a total reduction of 351.3 kg CO₂eq. By contrast, Scenario 2 involves pre-treatment requiring additional Ca(OH)₂ and anhydrous Na₂SO₄, which increases raw-material production emissions by 9.8 kg CO₂eq relative to the baseline. Scenario 5 results in an increase of 4% in fuel-combustion emissions due to the high moisture content of the waste, leading to the weakest overall mitigation with a net reduction of only 38.9 kg CO₂eq. Overall, these results indicate that although carbon benefits are generally achievable across different types of waste, their magnitude depends on waste composition and the intensity of the pre-treatment. In terms of resources, overall consumption decreases across all scenarios, but there is a trade-off between “material saving” and “energy saving”. Scenario 1 achieves the greatest overall saving of resources, with a reduction of 19.4% relative to the baseline. This is primarily due to its high substitution rate and avoidance of waste landfilling. However, its energy-intensive pre-treatment increases fossil resource consumption by 27.2%, offsetting the net energy benefit. Scenario 3 exhibits the most pronounced energy-saving effect, reducing fossil resource consumption by 18.9% *via* substituting approximately 20% of coal with coal gangue. However, although the substitution rate in Scenario 5 is 20%, a need to add bauxite to satisfy mineralogical requirements offset some of its material-saving potential. These findings highlight that the outcomes of resource use depend on substitution ratios and on the additional inputs required to meet clinker quality constraints. In terms of the environmental impact, the avoided disposal process has a significant effect on the results. When this process is included in the assessment, Scenario 1 demonstrates the most significant reduction in overall environmental impact at 84.7%, compared to the baseline. This is primarily due to the prevention of heavy metal emissions (*i.e.*, Cd, Se and As) linked to landfill. Scenario 2 shows a similar pattern, but improvements in human toxicity indicators are limited because mercury (Hg) emissions associated with producing anhydrous sodium sulphate (*i.e.*, anhydrous Na₂SO₄) offset part of the benefits. If avoided disposal is excluded, Scenario 3 exhibits the optimum overall environmental performance. In the comprehensive evaluation, Scenario 1 consistently ranks first under equal weighting and across all three dual-priority schemes, establishing itself as a core pathway with optimal overall benefits. Scenario 3 is suitable as a priority enhancement option under both “carbon emissions–resource priority” and “resource–environment priority” orientations. Scenario 2 can serve as an alternative under the objective of “carbon emissions–environment priority”.

Conclusions The five solid waste valorisation scenarios for clinker production had different advantages and constraints with regard to carbon mitigation, material conservation and environmental improvement. Scenario 1 delivered the optimum overall performance, but its high energy demand and associated pollutant emissions during pre-treatment could be limiting factors. Scenario 2 achieved considerable carbon reduction and environmental benefits, but it was limited by heavy metal emissions and energy consumption during pre-treatment. Scenario 3 could be characterised as “low risk, steady benefit”, offering significant savings in fossil energy without apparent adverse environmental impact. Scenario 4 yielded the modest gains across the board without any negative effects, making it suitable for routine implementation. Scenario 5 showed the greatest advantage in terms of photochemical smog control, but it had the weakest overall performance. To advance the valorisation of solid waste in the cement sector, we could recommend optimising the pre-treatment of high-substitution waste (*i.e.*, carbide and manganese slag) to reduce energy use and air pollutant emissions arising from energy-intensive steps. Large-scale substitution could be encouraged for wastes with a substantial valorisation potential (such as carbide and manganese slag) to further enhance integrated environmental benefits.

Keywords solid-waste alternative raw materials; low-carbon cement clinker; multidimensional assessment; life-cycle