

DOI: 10.5846/stxb202103140683

刘伟宁, 石垚, 张晨牧, 刘朗明, 李会泉, 庄才备, 孙天友, 胡应燕, 曹春, 李强. 长江经济带典型锌冶炼园区不同固废处置模式生态效率研究. 生态学报, 2022, 42(6): 2461-2476.

Liu W N, Shi Y, Zhang C M, Liu L M, Li H Q, Zhuang C B, Sun T Y, Hu Y Y, Cao C, Li Q. Ecological efficiency of different solid waste treatment modes in typical zinc smelting industrial park in Yangtze River Economic Belt. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2461-2476.

长江经济带典型锌冶炼园区不同固废处置模式生态效率研究

刘伟宁^{1,2}, 石 垚^{1,*}, 张晨牧¹, 刘朗明³, 李会泉^{1,4}, 庄才备³, 孙天友³, 胡应燕¹,
曹 春², 李 强¹

1 中国科学院过程工程研究所绿色过程与工程重点实验室, 湿法冶金清洁生产技术国家工程实验室, 北京 100190

2 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

3 株洲冶炼集团股份有限公司, 株洲 412007

4 中国科学院大学化学工程学院, 北京 100049

摘要:我国铜铅锌有色冶炼固废种类多、存量较大, 富含多种环境毒害元素如镉、铬、汞、砷等, 而目前固废末端处置方式单一, 对其所含的大量铜、铅、锌、银、镍等有色金属组分也未能有效分离, 固废污染防治与高效资源化利用问题突出, 已成为制约产业绿色可持续发展的关键因素。以长江经济带典型铜铅锌综合冶炼基地为例, 设置直接处理(情景 1)、内部循环(情景 2)和协同利用(情景 3)三种锌冶炼固废处置情景模式, 结合物质投入产出法、层次分析法与熵值法, 构建资源能耗、环境风险、物质循环与经济效益的多维生态效率指标核算方法体系, 对三种情景模式开展生态效率综合评估分析。结果表明, 情景 3 因加强了锌冶炼固废在铜、铅冶炼系统间的协同转化, 其生态效率综合评价指数最高, 为 0.2246, 较情景 1 和情景 2 分别高出 313.6% 和 25.5%; 从资源能耗角度来看, 情景 2 单位产品能耗最高, 达 0.3086; 而从物质循环和经济效益角度来看, 情景 3 固废综合利用率最高, 达 97.6%, 铜、铅、锌三种有色金属回收率达 97.2%, 利润总额达 48131.3 万元; 但在环境风险方面, 尽管情景 3 固废中重金属污染排放减少 1470.4 t/a, 但废气中铅、砷、镉、汞等重金属污染排放却比情景 1 增加了 3 倍以上, 达 1.59 t/a。综上所述, 情景 3 在固废二次资源综合利用和经济效益方面优势显著, 因此, 加强铜-铅-锌产业链间固废的协同利用, 不仅可大幅减少固废冗余量, 提高有色金属资源的回收效率, 增加经济效益, 还能有效降低水、土环境污染风险, 但大气中重金属污染排放问题仍亟需关注。

关键词: 锌冶炼; 投入产出分析; 生态效率; 固废协同利用; 情景分析

Ecological efficiency of different solid waste treatment modes in typical zinc smelting industrial park in Yangtze River Economic Belt

LIU Weining^{1,2}, SHI Yao^{1,*}, ZHANG Chenmu¹, LIU Langming³, LI Huiquan^{1,4}, ZHUANG Caibei³,
SUN Tianyou³, HU Yingyan¹, CAO Chun², LI Qiang¹

1 Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Green Process and Engineering, National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 School of geography and environmental science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

3 Zhuzhou Smelter Group Company Limited, Zhuzhou 412007, China

4 School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1903305); 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23030303); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41701550)

收稿日期: 2021-03-14; 网络出版日期: 2021-11-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yaoshi@ipe.ac.cn

Abstract: In China, there are many kinds of solid wastes of copper, lead and zinc non-ferrous smelting, which are rich in a variety of environmental toxic elements, such as cadmium, chromium, mercury and arsenic. At present, the disposal mode of solid wastes is still single and a large number of valuable metal components such as copper, lead zinc, silver and nickel have not been effectively separated. The problems of solid waste pollution control and efficient resource utilization are prominent, which have become the key factors restricting the green and sustainable development of the industry. This paper studied a typical case of copper, lead and zinc comprehensive smelting base an example in the Yangtze River Economic Belt, and set up three scenarios of zinc smelting solid waste disposal, namely, direct treatment (scenario 1), internal circulation (scenario 2) and collaborative utilization (scenario 3). In order to further carry out a comprehensive evaluation and an analysis of ecological efficiency for the three scenarios, we combined material input-output method with analytic hierarchy process (AHP) and entropy method. The multi-dimensional ecological efficiency index accounting method system was established, including resource and energy consumption, environmental risk, material cycle and economic benefit. The ecological efficiency of the three scenarios was comprehensively evaluated and analyzed as well. The results showed that scenario 3 strengthened the collaborative transformation of zinc smelting solid wastes between copper and lead smelting systems, and its ecological efficiency comprehensive evaluation index was the highest, which was 0.2246, 313.6% and 25.5% higher than scenario 1 and scenario 2 respectively; From the perspective of resource energy consumption, scenario 2 had the highest energy consumption per unit product, reaching 0.3086; The comprehensive utilization rate of solid waste in scenario 3 was the highest in respect of material circulation and economic benefits, reaching 97.6%. The recovery rate of copper, lead and zinc was 97.2%, and the total profit was 481.313 million yuan, however, in terms of environmental risk, while the emission of heavy metals in the solid waste in scenario 3 decreased by 1470.4 tons per year, the emission of heavy metals such as lead, arsenic, cadmium and mercury in the exhaust gas increased by more than three times compared with scenario 1, reaching 1.59 tons per year. To sum up, scenario 3 had significant advantages in the comprehensive utilization of solid waste secondary resources and economic benefits. Therefore, strengthening the collaborative utilization of solid waste among the copper-lead-zinc industry chain can not only greatly reduce the solid waste redundancy, improve the recovery efficiency of valuable metal resources, increase economic benefits, but also effectively reduce the risk of water and soil environmental pollution. Nevertheless, the emission of heavy metal pollution in the atmosphere still needs to be paid more attentions.

Key Words: zinc smelting; input-output analysis; ecological efficiency; solid waste collaborative utilization; scenario analysis

包括铜铅锌在内的有色金属冶炼是我国的重要基础行业,2020 年上半年我国锌产量达 252.7 万吨,同比增长 9.1%。湿法炼锌是世界上较主流和先进的冶炼方法,资源产出率高,我国 95% 以上的锌产品都通过湿法炼锌进行生产^[1]。然而湿法炼锌所产生的固废种类多、数量大,2018 年以来我国每年锌冶炼产生的浸出渣、窑渣、铁矾渣、硫化渣等固废量达 300 万吨以上,整体综合利用率仅为 60%^[2],特别是铅锌尾矿综合利用率仅为 10% 左右^[3],且其固废资源回收利用过程产生的二次污染问题突出。这些固废中既含有大量铜、铅、锌等有价资源,也含有镉、汞、砷等环境毒害组分,其特殊的资源环境复杂属性已成为制约锌冶炼行业及其所在区域或园区绿色可持续发展的关键。针对当前锌冶炼行业普遍存在的能耗高、污染大,且固废有价金属元素回收率低的问题,部分企业已开始逐步探索其固废的资源高效回收利用处理模式。如国内某湿法炼锌厂挥发窑渣回收项目投产以来,采用磁选分离技术,已累计处理挥发窑渣 20 多万吨,创造经济效益 2300 万。但鉴于目前国内外关于锌在内的有色冶炼固废综合利用模式及工艺路线较多,因此开展不同固废资源化利用模式下的综合生态效率评估研究,并选择最优的固废处置路线具有重要的现实意义。

目前针对区域固废资源化处理的生态效率评价研究主要集中在经济 and 环境影响方面,如 Newman 等^[4]提

出了城市物质代谢是基于资源输入与废弃物产出分析的生物系统模式;Wan 等^[5]采用系统动力学方法研究铜冶炼过程,提出实现可持续发展的一些措施,以提高资源回收利用率,减少废物排放;Huang 等^[6]通过投入产出模型与固废组成结构解析,定量表征了我国固体废物回收的驱动路径;赵薇^[7]建立准动态生态效率分析模型,并对城市生活垃圾管理系统的经济和环境特性进行分析;吕彬等^[8]采用生态效率分析方法对电子废物回收处理体系的不同策略进行模拟比较,探索了合理高效的电子废物回收处理模式;岳强等^[9]采用总物流分析模型并结合脱钩指标,对钢铁工业生态效率进行分析;毛玉如等^[10]基于循环经济理论构建了铝工业共生链网,以提高铝工业生态效率;黄锡生等^[11]在生态效率视角下定性研究了建筑废弃物减排与利用的法律机制;贾冯睿等^[12]采用物质流分析方法,构建了铜资源生态效率综合评价体系,并对未来发展趋势做出预测;张海涛等^[13]采用线性规划法,对比分析了以煤矿固废为原料的新型墙体材料生产和传统生产的生态效率,促进了煤炭工业固废资源化利用;Cudjoe 等^[14]结合我国钢铁行业及有色冶炼等固废处置现状,通过建立循环回收利用模型,分析了固废综合利用过程在电力消耗、温室气体以及空气污染物排放等几个方面的影响。

当前,铜铅锌联合冶炼作为一种全新的工业发展模式,在有色金属领域已逐步发展起来。该模式涉及到多种固废综合利用技术及路线的组合,然而针对这些不同的固废协同处理路线开展相应的生态效率比较研究则相对较少。因此本研究选择我国长江经济带典型的铜铅锌综合冶炼基地为案例,结合工业园区多尺度物质投入产出分析法、层次分析法与熵值法,建立了一套锌冶炼园区固废协同利用生态效率评价指标体系;并基于锌冶炼固废的处置现状及其在系统内和系统外,即铜、铅冶炼系统间的不同处置模式选择,划分了传统处置方式、内部循环利用、铜铅锌系统间协同三种情景模式,同时构建了不同模式下的锌冶炼固废物质代谢框架,追溯其有价及危害元素流动路径;最终从资源消耗、环境风险、物质循环以及经济效益 4 个维度对 3 种模式进行综合比较评估,以期得到最优的固废处置路线。同时,也为实现铜铅锌联合冶炼清洁生产目标及其所属区域环境效益提升提供理论依据。

1 研究方法

1.1 园区锌冶炼系统物质代谢框架

投入产出分析作为经济学研究的重要方法,在区域资源能源环境领域上也广为应用,主要是对行业活动中资源能源投入和环境污染排放进行定量分析^[15]。其中,价值型投入产出表是投入产出方法的基础^[16],而基于物质型的投入产出分析方法,则重点是遵循质量守恒定律来进行构建^[17]。园区锌冶炼系统物质代谢框架(图 1)包括物质投入端、系统物质转换和物质输出端三个部分,锌精矿等原、辅料在系统内部物质转换后,一部分以含锌等有价金属元素产品的形式产出,另一部分则作为“三废”排入园区环境系统。

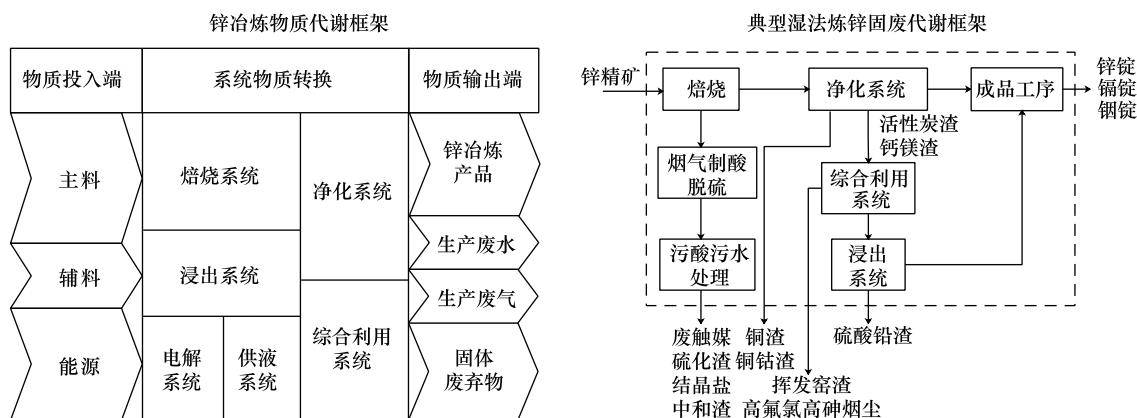


图 1 园区锌冶炼系统代谢框架

Fig.1 Metabolic framework of zinc smelting industrial park system

锌冶炼既含有焙烧、回转窑等高温火法过程,也含有浸出、电解等化学湿法过程,既向园区环境中排放包含 SO_2 、 NO_2 、 CO_2 等大量烟气^[18],也产生大量含 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、重金属离子等的生产废水;同时各生产工序排出的过程产物及冶炼渣、尘、泥类固废,大多属于危险废弃物。锌精矿经焙烧、浸出净化、电解、综合回收等生产阶段后,可产出锌锭、镉锭、铜锭等金属资源成品;以及钙镁渣、尾矿渣、硫化渣等近 20 种固体废弃物。

1.2 园区固废综合利用模式情景设置

锌冶炼园区或基地固废综合利用模式即通过锌冶炼系统内部及其与基地内铜、铅冶炼,或其他系统间的物质循环,将与锌冶炼相关的不同系统产生的固废中有价元素最大限度回收,实现基地范围内难处理渣尘泥类固废的减量化和资源化,使整个锌冶炼工艺能耗降低,资源产出率提高,达到节能提效减排的目的。

如锌浸渣是锌湿法冶炼浸出工段的主要产物,目前其主流资源化处置方式是采用挥发窑火法工艺^[19],来回收其中所含的 Zn、Pb、In、Cd 等有价金属资源^[20]。但在其资源化处置过程中,由于一部分氟、氯化物以机械夹杂和挥发等方式随同进入锌氧化物烟尘中,因此,挥发出的氧化锌粉尘中由于氟、氯含量较高,仍需采用相应的设备进行脱氟氯处理^[21]后才能再次进入浸出工序。

根据固废常规处理模式及其有价金属元素分布特点,结合铜铅锌综合冶炼基地实际生产工艺情况,将锌冶炼固废综合利用模式分成以下 3 种情景。一是直接堆存售卖处理,二是锌系统内资源化处置,三是铜铅锌基地协同冶炼资源化处置,如图 2 所示。

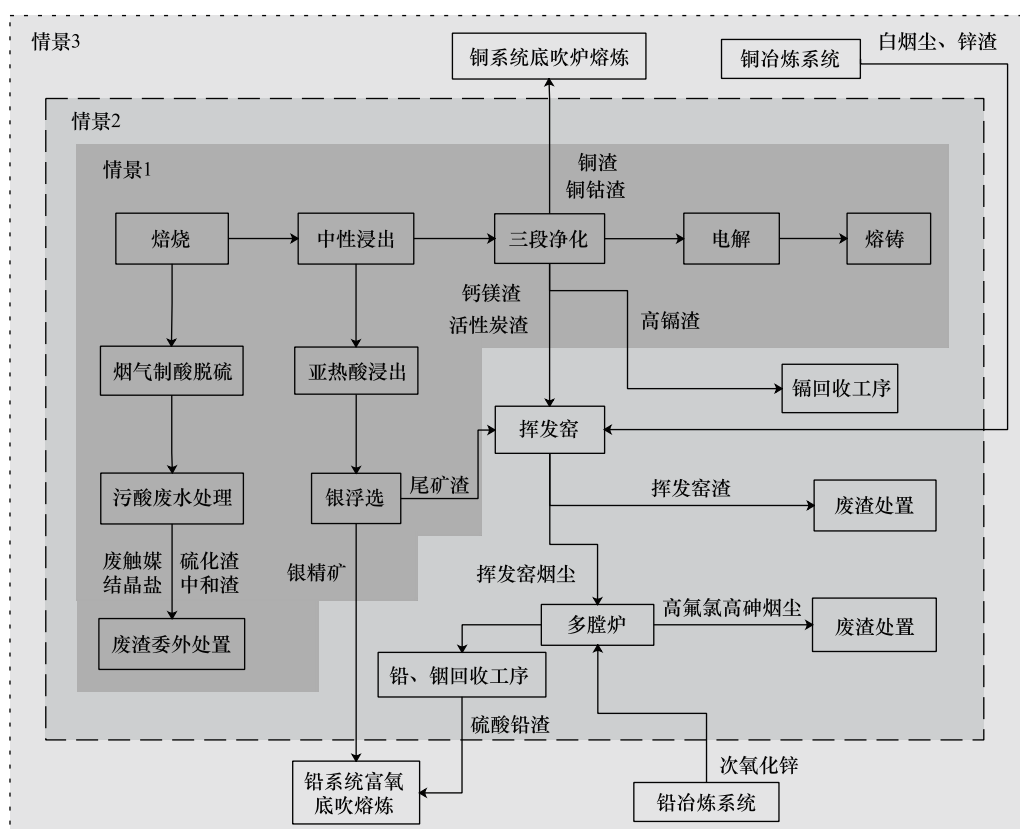


图 2 锌冶炼固废不同综合利用情景模式

Fig.2 Different comprehensive utilization scenarios of solid waste from zinc smelting

情景 1 主要涉及锌成品链及烟气脱硫处理等,部分废渣直接外运至固废资质处置单位;情景 2 在情景 1 的基础上新增“挥发窑-多膛炉”火法资源化工艺,使固废在系统内部循环流动;情景 3 是将锌冶炼固废转运至基地内的铜、铅系统,将铜、铅冶炼固废转运至锌系统进行资源化协同冶炼处理。各情景下不同固废具体处置路径如表 1 所述。

在锌冶炼产生的固废中,挥发窑窑渣为一般固体废物,而多膛炉产生的高氟氯高砷烟尘富集大量氟氯元素,作为危险废物,不能直接返回火法冶炼,需委托相关资质单位进行回收处理。触媒作为烟气制酸转化工序的催化剂,其废料废触媒的主要成分为五氧化二钒(V_2O_5),污酸和酸性废水处理过程中,催化吹脱工序产生的氟氯混酸经过碱液吸收,生成高氟氯浓盐水,主要成分为氯化钠、氟化钠,所产生的结晶盐与废触媒同属危险固废,需定期运送至危废资质处置单位循环再生。针对委外处理的部分废渣,本文仅考虑在冶炼生产过程中对环境产生的影响,分析其中 Cu、Zn、Pb 等有价金属元素及其危害组分 Hg、As 元素流动对环境的总体负担。

表 1 锌冶炼不同情景下固废处置路径

Table 1 Disposal path of solid waste in different scenarios of zinc smelting

情景类型 Scenario type	情景模式 Scenarios	固废处置具体路径 Specific path of solid waste disposal
1	直接处理模式 (改造前)	废触媒、硫化渣、结晶盐、中和渣外运至固废资质处置单位 活性炭渣、钙镁渣、尾矿渣暂时堆存
2	锌系统内部循环模式 (改造后现状)	在情景 1 基础上新增氧化锌粉、高镉渣等 挥发窑烟尘输送至多膛炉车间脱氟氯 挥发窑渣分离出焦粉、铁粉后外售 高氟氯高砷烟尘(危险废物)委托资质单位处理
3	铜铅锌基地协同资源化模式 (二期改造后未来)	在情景 2 基础上新增铜渣、铜钴渣、银精矿、硫酸铅渣 铜渣、铜钴渣输送至铜冶炼熔炼 铜冶炼产出的白烟尘锌渣输送至锌冶炼挥发窑 银精矿、硫酸铅渣输送至铅冶炼底吹熔炼 铅冶炼产出的次氧化锌输送至锌冶炼多膛炉

1.3 生态效率指标及方法构建

为了分析不同情景下锌冶炼系统固废综合利用的生态效率,本研究将锌冶炼系统作为评估对象整体,运用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP),构建工艺-企业-园区多尺度生态效率评价指标体系,同时,结合熵值法(The Entropy method)对各个指标的数据进行标准化处理。指标体系第一层以生态效率综合评价指数作为目标层,其下一层为准则层,分为资源消耗、环境风险、物质循环、经济效益四个功能指标,准则层下为指标层,根据 AHP 进行权重赋值,生态效率评价指标体系如表 2 所示。

锌冶炼过程消耗大量的原辅料、新鲜水以及化石能源,现有的针对铜铅锌等有色金属冶炼生态效率分析中,大多数的指标选取也都集中在资源能源的消耗^[24—25]、三废的排放^[26—27]以及经济效益^[28—29]三个主要方面。本研究在结合铜铅锌冶炼固废资源化评估相关文献研究与工艺生产实际情况的基础上,首先设置了资源消耗、环境风险与经济效益三类重要指标,另外,不同情景模式下的固废协同利用往往伴随着多种类型固废堆存量的改变及其所含金属元素的流动过程,对整体的资源流动代谢有着直接影响。因此,针对固废资源化的特性,也从物质循环角度综合考虑了固废协同利用下的生态效益情况。

根据各指标间的关系,结合专家打分值及相关文献^[30—34]对比情况,对四个准则层的赋值进行两两比较,得到判断矩阵。运用 Yaahp 软件对矩阵数据进行处理,求出相对应的特征向量,再进行向量标准化处理,得到各指标相对于准则层的权重。

由于各个指标具有不同的指标特征,其统计量纲、数量级等具有较大差异,无法进行指标间的直接对比,因此需按照一定标准对不同指标值进行数据标准化处理,使指标之间具有可比性。本研究根据不同指标对生态效率的正向和负向效用,采用不同的标准化公式^[35]。

正向指标的标准化公式为:

$$S_{ij} = (A_{ij} - b_j) / (a_j - b_j) \quad (1)$$

负向指标的标准化公式为:

$$S_{ij} = (a_j - A_{ij}) / (a_j - b_j) \quad (2)$$

式中, S_{ij} 为指标标准值; A_{ij} 为指标实际值; a_j 为对应指标序列最大值; b_j 为对应指标序列最小值。其中, $i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2, \dots, 11$ 。

表 2 生态效率评价指标体系
Table 2 Evaluation index system of ecological efficiency

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	公式 Formula	说明 Explain	数据来源 ^[22—23] Data sources
生态效率综合评价指数(A) Comprehensive evaluation index of ecological efficiency(A)	资源消耗 (B ₁)	单位产品原料消耗(C ₁)	$C_1 = \frac{M_1}{N}$	M ₁ :原料消耗量 N:锌产品总量	典型锌冶炼厂实例核算
		单位产品辅料消耗(C ₂)	$C_2 = \frac{M_2}{N}$	M ₂ :辅料消耗量 N:锌产品总量	典型锌冶炼厂实例核算
		单位产品综合能耗(C ₃)	$C_3 = \frac{M_3}{N}$	M ₃ :能耗总量 N:锌产品总量	典型锌冶炼厂实例核算
		单位产品新鲜水耗(C ₄)	$C_4 = \frac{M_4}{N}$	M ₄ :水耗总量 N:锌产品总量	典型锌冶炼厂实例核算
	环境风险 (B ₂)	废水特征污染物排放量(C ₅)	$C_5 = S_1 \times Q_1$	S ₁ :特征污染物百分数 Q ₁ :废水排放总量	典型锌冶炼厂实例核算
		废气特征污染物排放量(C ₆)	$C_6 = S_2 \times Q_2$	S ₂ :特征污染物百分数 Q ₂ :废气排放总量	典型锌冶炼厂实例核算
		固废特征污染物排放量(C ₇)	$C_7 = S_3 \times Q_3$	S ₃ :特征污染物百分数 Q ₃ :固废排放总量	典型锌冶炼厂实例核算
	物质循环 (B ₃)	固废综合回收利用率(C ₈)	$C_8 = \frac{P_1}{Q_3}$	P ₁ :固废回收利用总量	典型锌冶炼厂实例核算
		目标金属元素回收利用率(C ₉)	$C_9 = \frac{K}{J}$	K:固废及原料中目标金属元素含量 J:产品中目标金属元素含量	典型锌冶炼厂实例核算
	经济效益 (B ₄)	主要资源产出率(C ₁₀)	$C_{10} = \frac{W}{L}$	W:工业园区生产总值 L:主要资源实物消费量	典型锌冶炼厂实例核算
		固定资产投资额(C ₁₁)	$C_{11} = R_1 + R_2 + R_3$	R ₁ :锌项目固定资产投资额 R ₂ :铜项目固定资产投资额 R ₃ :铅项目固定资产投资额	典型铜铅锌综合冶炼基地可研报告、典型锌冶炼厂 2019 年度报告
		利润总额(C ₁₂)	$C_{12} = T_2 - T_1$	T ₁ :生产成本 T ₂ :营业收入	典型铜铅锌综合冶炼基地可研报告

单位产品指标均以 1 t 锌产品为计

得到各个指标标准化值后,对准则层用如下公式^[36]进行计算:

$$B = \sum_{i=j}^m \omega_i \times D_i \tag{3}$$

式中, B 为相对应的准则层功能指标值; ω_i 为指标层因子指标的相应权重值; D_i 为指标层因子指标标准化值; j, m 分别为相应元指标的序号。

得到指标层数值后,生态效率综合评价指数用如下公式^[37]进行计算:

$$A = \sum_{i=j}^n B_i \times D_i \tag{4}$$

式中, A 为相对应的准则层功能指标值; B_i 为准则层因子指标的值; D_i 为准则层因子指标标准化值; j, n 分别为相应元指标的序号。

2 不同情景生态效率指标评价

2.1 投入产出清单分析

针对典型锌湿法冶炼生产工艺及其铜铅锌基地固废协同消纳情况,收集了焙烧、酸浸、净化、电解、综合回

收等生产阶段的物质投入产出相关数据。其中投入端包括原料消耗、辅料消耗、能耗、水耗及固废消纳 5 大类别,产出端包括工业成品、废水特征污染物、废气特征污染物和固废排放 4 大类别。三种情景均以锌冶炼系统整体为研究对象,因此在原料投入上只考虑锌精矿的消耗量。其中,不同情景模式下的物质投入产出情况如表 3 所示。

表 3 不同情景模式投入产出清单
Table3 Input-output inventory of different scenarios

物质类型 Material type			情景 1/(t/a) Scenario 1	情景 2/(t/a) Scenario 2	情景 3/(t/a) Scenario 3
总投入 Total investment	原料消耗	锌精矿	638584.99	638584.99	638584.99
	辅料消耗	锰矿粉	4372.9478	5301.8281	5880.74
		液碱	2855.2350	3461.7302	3839.72
		凝聚剂(3#)	157.0493	190.4090	211.20
		锌粉	9993.9178	12116.7772	13439.82
		活性炭	713.8087	865.4325	959.93
		砷盐	283.5811	343.8181	381.36
		五氧化二钒	50	50	50
		硫化钠	1041	1041	1080.71
		氯化铵	350.9815	425.5353	472
		硫酸	90973.7706	110297.9761	122341.52
		盐酸	—	332.10	342.58
		P204 萃取剂	—	33.21	33.21
		石灰石粉	—	—	918.54
		耐火砖	—	—	14.88
		铁屑	—	—	4.10
		双氧水	—	—	16.88
		硫磺	—	—	9.710
		硅氟酸	—	—	104.95
		硝酸钾	—	—	11.46
		硝酸	—	—	18.88
	固废消纳	活性炭渣	—	971.77	971.77
		钙镁渣	—	600.19	600.19
		高镉渣	—	5263	5263
		尾矿渣	—	276598.92	276598.92
		铜渣	—	—	1383.33
		铜钴渣	—	—	1985
		银精矿	—	—	23061.09
		硫酸铅渣	—	—	28445.70
		白烟尘锌渣	—	—	1109.08
		次氧化锌	—	—	16853.44
	能耗	电	134267.309	153676	154189.4932
		天然气	3359.0574	12989.8	13406.8118
		焦炭	0	120296.2	120316.2944
	水耗	新鲜水	2682900	2787840	2813258
总产出 Total output	工业成品	锌锭	238994.6593	289760.7412	321400
		硫酸	608096	608096	616580
		镉锭	—	1756.81	1756.81
		铜锭	—	66.42	66.42
		铜产品	—	—	9212.1057

续表

物质类型 Material type		情景 1/(t/a) Scenario 1	情景 2/(t/a) Scenario 2	情景 3/(t/a) Scenario 3
废水特征污染物	铅产品	—	—	10227.2444
	H ₂ SO ₄	4673.262	4696.494	4950.5567
	As	279.1008	352.209	374.4671
	F	34.7886	38.9796	50.8083
废气特征污染物	Cl	1320.462	1330.1706	1349.831
	SO ₂	153.5133	342.0806	348.5282
	NO ₂	169.4343	314.1011	320.7443
	PM ₁₀	117.8377	136.0695	140.8653
	Pb	0.5258	1.2624	1.4441
	As	0.1129	0.3518	0.3972
	硫酸雾	24.2827	32.7016	33.1882
固废排放量	氟化物	3.6650	6.8494	6.8494
	Cd	0.1465	0.5356	0.5357
	Hg	0.0062	0.0062	0.0062
	废触媒	53.73	53.73	53.73
	硫化渣	1360	1360	1360
	结晶盐	3564	3564	3564
	中和渣	2475	2475	2475
	铜渣	1140.9705	1383.33	—
	铜钴渣	1637.228	1985	—
	活性炭渣	971.77	—	—
	钙镁渣	600.19	—	—
	高镉渣	5263	—	—
	尾矿渣	276598.92	—	—
	银精矿	19020.7870	23061.09	—
	挥发窑渣	—	205081.4553	227474.5
	高氟氯高砷烟尘	—	2098.7999	2327.97
	硫酸铅渣	—	28445.7	—
	铜系统废渣	—	—	6221.67
	铅系统废渣	—	—	7874.51

能耗折合标准煤耗量为计

2.2 资源能源消耗

根据本研究案例典型锌冶炼现状(即情景 2)物质投入产出清单数据分析,锌冶炼主要消耗锌精矿原料 63.86 万 t/a,产生的成品包括锌锭、铜锭、镉锭三种金属产品共计 29.16 万 t/a,另外副产硫酸 60.81 万 t/a。结合生态效率评价指标体系分析模型,得到锌冶炼系统不同情景下总体及单位产品的资源能源消耗情况,如图 3 所示。

由图可知,从案例锌冶炼系统改造前后及未来二次改造后资源能源消耗水平对比来看,即从情景 1 到情景 3,在原料锌精矿总消耗量不变前提下,除总能耗显著增加外,辅料总耗、水总耗均呈略微递增趋势,其中情景 2 和情景 3 总能耗比情景 1 增加 1 倍以上。另外从单位产品资源能源消耗水平来看,从情景 1 到情景 3 原料消耗和新鲜水耗却呈递减趋势,递减率分别达到 6.2%和 2.2%的水平;由于情景 2 投入端中,钙镁渣、尾矿渣等锌冶炼内部消纳固废和情景 3 中铜渣、硫酸铅渣等园区内外部消纳固废均不作为辅料进行核算,因此在单位产品辅料消耗方面,情景 2 比情景 1 增加了约 14.2%,情景 3 相比情景 2 仅增加 6.3%;同时由于新增的固废协同处理火法工艺流程,情景 2 和情景 3 在单位产品能耗方面显著高出情景 1,分别增加了近 89.1%和 79.7%。

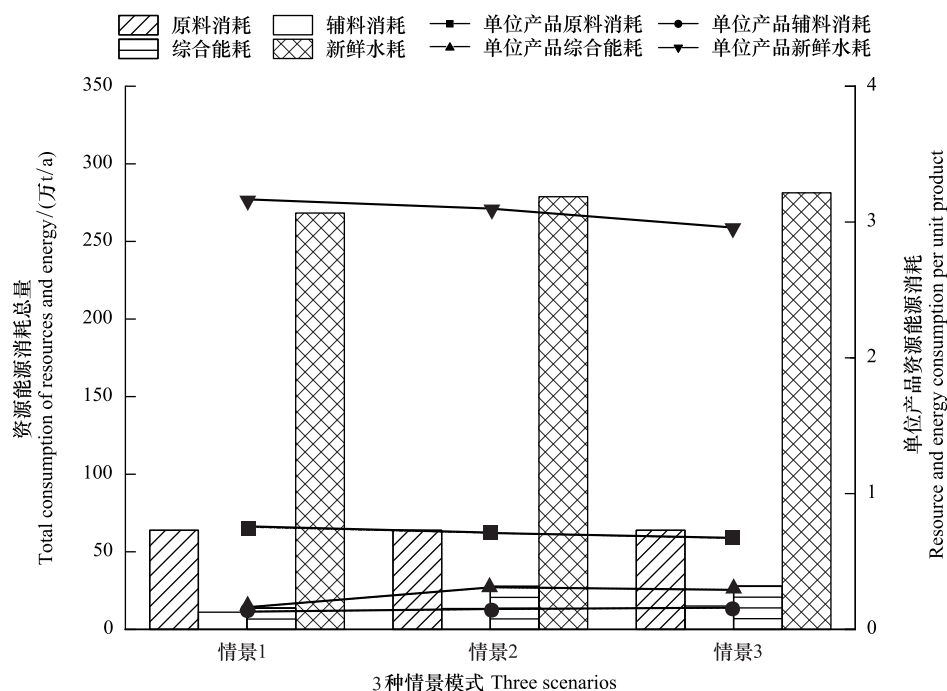


图3 不同情景模式资源能源消耗

Fig.3 Resource and energy consumption of different scenarios

情景2和情景3在辅料消耗、综合能耗和新鲜水耗方面大幅提升的主要原因是增加了“挥发窑-多膛炉”固废资源化工艺,目的是处理锌电解过程产生的浸出渣和其他含锌固废,并通过烟化除氟氯工序及电解工序提取出锌产品,在增加固废综合利用的同时大幅提升生产效率。而与情景2相比,情景3在增加了锌-铜协同、锌-铅协同固废资源化装置后,虽然总体资源能耗水平提升,但由于其产生了阴极铜、硫酸等伴生产品,因此在单位产品资源能耗方面,情景3与情景2差异不大。其中,固废资源化工艺采用的回转窑装置在焙烧含锌固废过程中,每吨综合能耗增加约397 kgce^[38],多膛炉脱氟氯过程每吨综合能耗增加约234 kgce^[39],因此低能耗回转挥发窑技术的提升将是降低锌冶炼系统固废协同利用能源消耗和增加资源产出率的重点。

2.3 环境风险

从锌冶炼系统对所在区域环境污染排放情况来看,锌冶炼废水主要由制酸工段和湿法工艺车间产出,含有较高的H₂SO₄、As元素污染物且氟氯离子含量偏高。废气的排放节点较多,且含有大量SO₂、NO₂、PM₁₀、氟化物、硫酸雾以及Pb、As、Cd、Hg等重金属污染物质。另外,锌冶炼固废为湿法冶炼过程中产生的废渣、烟尘和过程物质,包含Cd、Hg、As等重金属污染元素。结合生态效率评价指标体系分析模型,得到锌冶炼系统不同情景下水、气、固三种介质特征污染物的排放情况,如图4所示。

从废水特征污染物排放情况来看,三种情景均以H₂SO₄排放量占比最高,在70%以上,其次为氯离子排放,在20%左右,而水体中的重金属除As外,基本无排放;另外从不同情景废水中各特征污染物排放总量来看,情景1到情景3各因子排放呈递增趋势,但增长率仅为1.7%和4.8%,差别不显著。而在废气特征污染物排放方面,情景2和情景3中除Hg无变化外,不论是SO₂、NO₂、PM₁₀等一般污染物,还是Pb、As、Cd等重金属污染物的排放均较情景1有显著递增趋势。其中情景2与情景1相比,SO₂、NO₂、氟化物排放量增加了1倍多,As、Cd排放量增加了近3倍;而情景3与情景2相比,尽管SO₂、NO₂等排放量只增加了2%左右,但Pb、As排放量却分别增加了14.4%和12.9%,其他类型污染物排放量如氟化物、Cd等则无明显变化。

从固废中重金属释放的环境风险来看,情景1到情景3呈明显的递减趋势,递减率分别达到35%和63%。情景1主要产出浸出渣(尾矿渣)、高镉渣和银精矿等固废,Cd、As含量占比最高,分别占到固废中重金属总

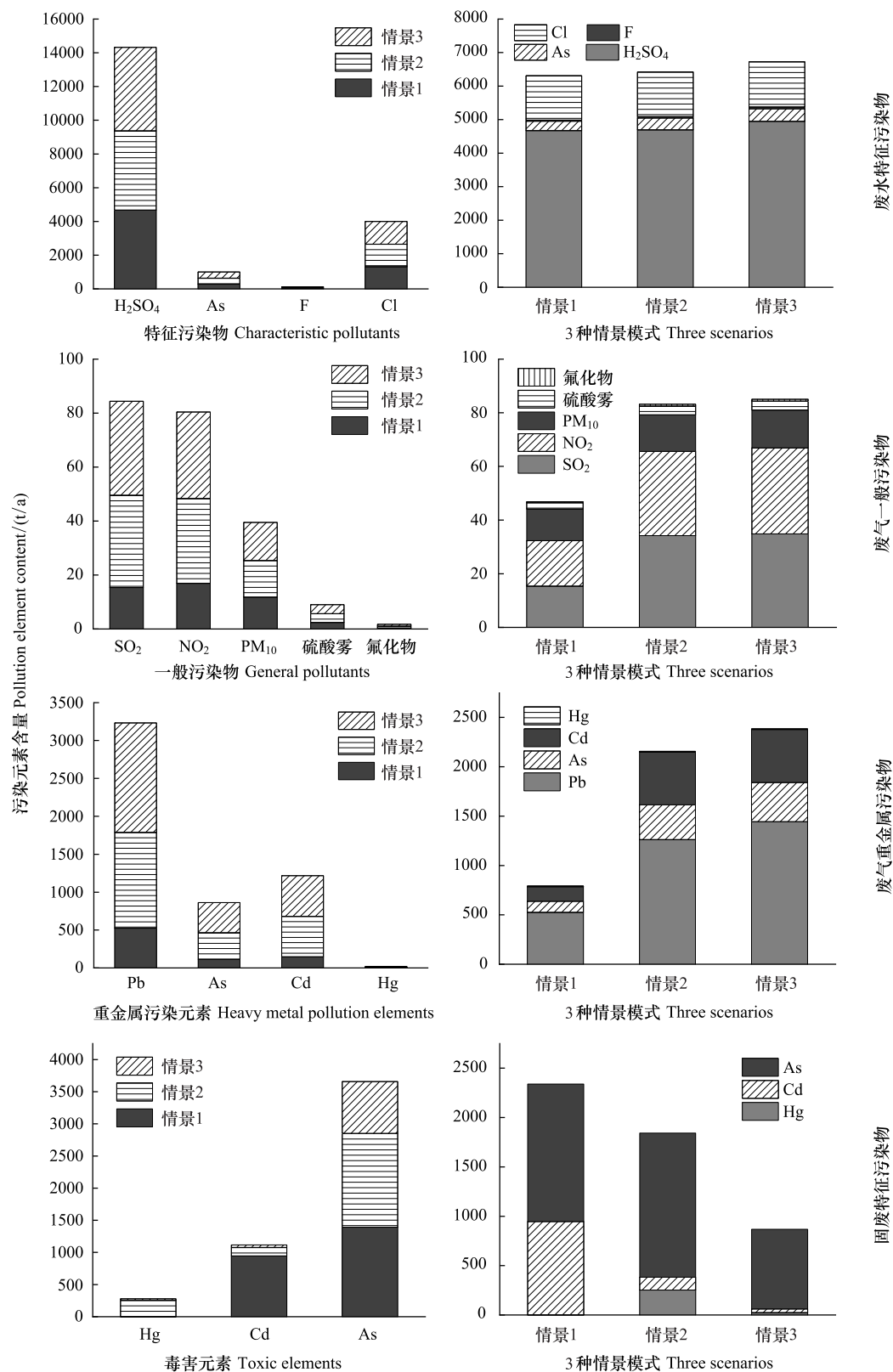


图4 不同情景特征污染物排放量

Fig.4 Pollutant emissions of different scenarios

量的 40.4% 和 59.5%; 情景 2 在回收浸出渣、高镉渣中 Zn、Cd、Ag 等金属的同时, 也排出了含 Hg、As 的硫酸铅渣、挥发窑渣和高氟氯烟尘, 同时造成了 As 在固废中重金属总量的占比超过了 80%; 而情景 3 在情景 2 基础上, 新增了硫酸铅渣固废协同处理工艺, 在消除了固废中 Cd 和 Hg 的环境风险同时, 使得 As 元素含量相较于情景 2 也同比下降了 55.3%。

三种情景模式均采用了较为先进成熟的“硫化-电渗析-蒸发-催化吹脱-结晶”工艺, 来处理锌冶炼过程产生的含重金属污酸及酸性废水, 大幅提升了锌冶炼废水的综合利用效率和废水中的污染物排放。情景 2 和情景 3 由于增加了锌-铜、锌-铅固废协同资源化工艺, 使得 Cd、Hg、As 等金属元素在不同相态之间转化, 将原本富集在废水和粉尘之间的毒害元素组分转移至固废当中, 并通过固废资源化过程回收消纳, 从而降低特征污染物在水、气介质中的有害含量。故在废水与废气排放方面, 情景 2 和情景 3 与情景 1 相比, 虽然排放的重金属及氟氯离子污染物含量略微增长, 但在固废环境风险水平上, 递减效益显著。因此, 固废协同处置资源化技术的提升将是直接降低锌冶炼环境风险影响的有效途径。

2.4 物质循环

铜铅锌协同冶炼(即情景 3)模式下每年可回收消纳固废约 35.6 万吨, 新增综合回收 Zn、Cu、Pb、Cd 等各类有价金属 10.4 万 t。结合生态效率评价指标体系分析模型, 得到锌冶炼系统不同情景下固废协同资源化情况, 如图 5 所示。

从固废综合利用总体情况来看, 情景 2 实现了对锌冶炼活性炭渣、钙镁渣、高镉渣及尾矿渣等近 28.3 万 t/a 固废的综合回收, 固废综合回收利用率达到了 90.7%; 情景 3 在此基础上, 与基地内铜、铅系统协同转化铜渣、铜钴渣、银精矿以及硫酸铅渣共计 5.5 万 t/a, 固废综合回收利用率比情景 2 提升了 7.7%。另外, 从包括原辅料和协同固废在内所有金属产品的总回收情况来看, 情景 1 到情景 3 也呈显著的递增趋势, 且递增率分别达到 22% 和 14.5%; 其中, 情景 2 对锌冶炼固废中 Zn、Cd、In 的回收量分别为 50766、1757、66.42t/a, 金属总回收率达到了 94.8%; 而情景 3 又进一步回收了情景 2 所产生固废中的 Cu、Zn、Pb 三种金属, 分别为 9212、31639、10227t/a, 金属总回收率达到了 97.2%。

3 种情景模式下的锌冶炼固废均含有丰富的 Cu、Pb 等有价金属组分, 含量占比分别为 51.9% 和 17.8%, 而情景 3 中的铜、铅冶炼固废当中又含有近 40% 的 Zn。因此, 在增加锌系统内部固废资源化工艺基础上开展铜铅锌基地协同冶炼, 即可回收大量的 Cu、Pb、Zn、Cd、In 等金属产品, 同时最终产生的挥发窑渣还可通过“磁选-分离”技术后产出焦粉和铁粉外售, 余渣则作为建筑原料进行跨区域跨产业综合利用。这种园区固废协同资源化模式不仅削减了堆存固废的含量, 使得危废组分降低, 还可以有效地回收有价金属元素, 大幅提高有色冶炼资源产出及利用效率。

2.5 经济效益

本研究案例根据国家“循环经济发展评价指标体系”标准^[40], 经过测算得到锌冶炼系统现状(即情景 2)主要资源产出率为 6435.52 元/t, 固定资产投资额为 425088 万元, 利润总额为 46201 万元/a。其中, 锌冶炼系统不同固废资源化情景模式下的资源产出和经济效益情况, 如图 6 所示。

锌冶炼固废协同利用模式的产品主要为锌锭、镉锭、铜锭和硫酸, 其中, 锌锭营业收入占比高达 86.08%, 镉锭占比最少, 仅为 0.38%。在生产过程中, 消耗大量的煤、石油、天然气等化石能源以及铜、铝、铅、锌、镍等有色金属资源, 同时还包括石灰石等非金属资源和木材等生物质资源。其产出的废触媒、硫化渣、高氟氯高砷烟尘等大多为危险废物, 需要委托资质单位处理。以情景 1 废触媒为例, 其处理成本高达 5000 元/吨, 每年处理成本约为 30 万元; 而情景 2 固废系统内部循环工艺针对高镉渣、尾矿渣等固废进行资源化回收后, 从中提取了 Cd、In 等有价金属元素, 增加销售收入近 30000 万元/a, 同时节省了危废处置成本近 50000 万元/a。

锌冶炼系统固定资产投资额包括焙烧、烟气制酸、湿法冶炼及固废协同转化等工程建设投资费用, 不包括建设期贷款利息和铺底流动资金。从情景 1 到情景 3, 在固定资产投资递增率分别为 24.9% 和 1.6% 情况下, 利润总额也依旧呈递增趋势, 且情景 3 利润总额高达 48131.30 万元/a; 同时, 情景 3 的主要资源产出率也最

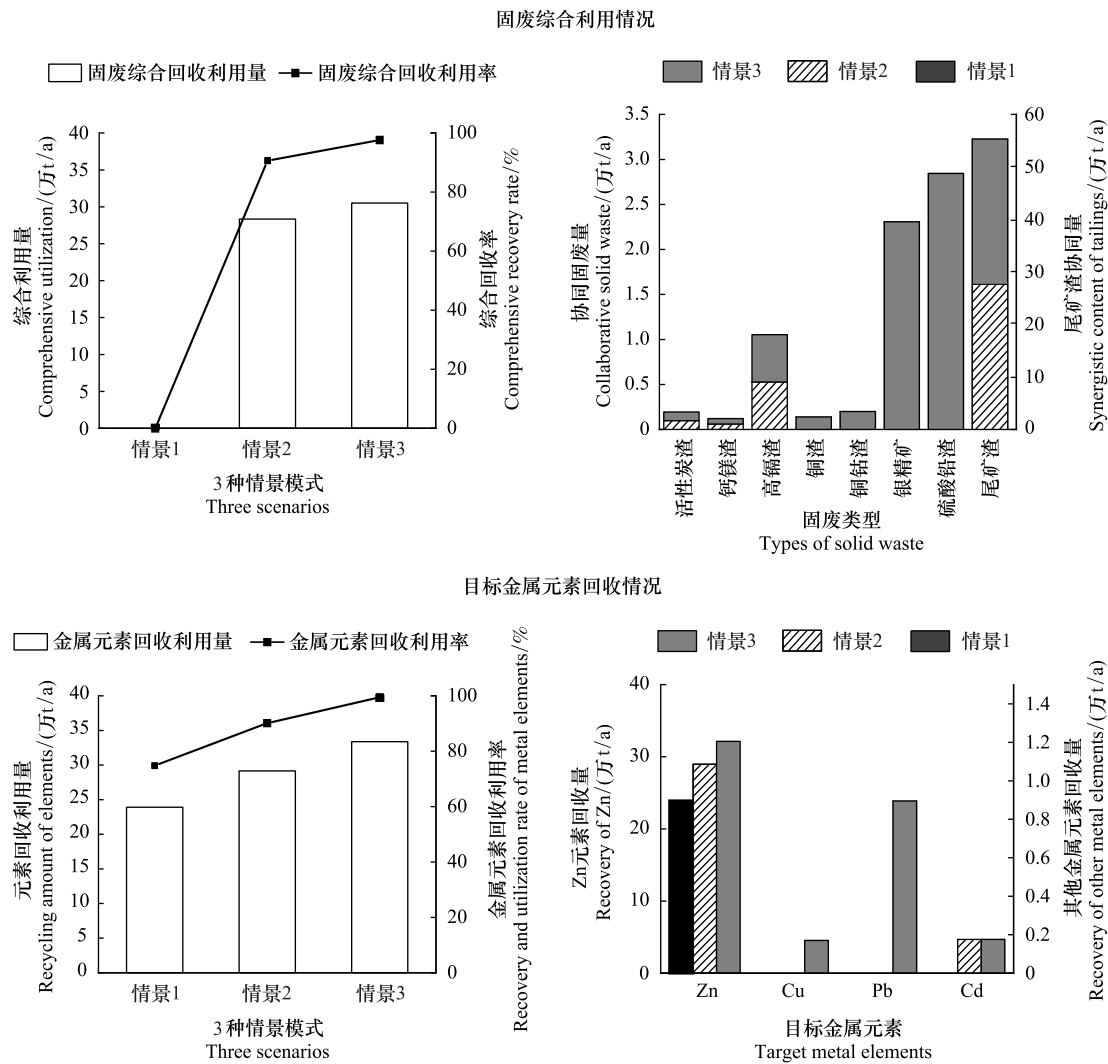


图5 不同情景固废协同资源化情况

Fig.5 Collaborative utilization of solid waste in different scenarios

高,比情景 2 增加了 701.37 元/t,增长率达到 10.9%。因此铜铅锌协同冶炼将是提升有色固废资源化经济效益的最佳途径。

3 不同情景生态效率综合评价

3.1 生态效率各级评价指标分析

根据生态效率评价指标体系分析模型,得到生态效率综合评价指标的基本权重及不同情景下二级指标对应的标准值,如表 4 所示。

根据公式(1)—(4)及各级评价指标基本权重、标准值结果,得到锌冶炼固废三种不同协同处理模式下的一、二级指标生态效率评价值,如图 7 所示。

单位产品原料消耗等 12 项二级指标结果分析已在

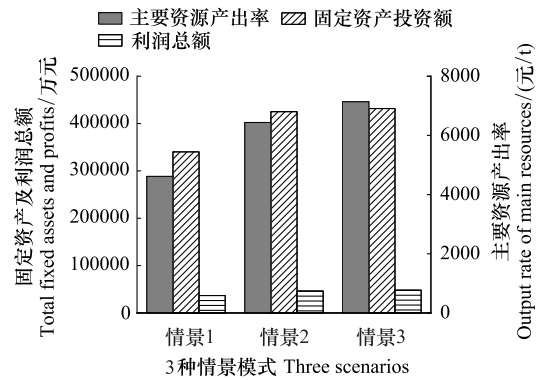


图6 不同情景固废资源化效益

Fig.6 Benefits of solid waste recycling for different scenarios

本研究第二部分进行详细论述。另外,从资源能耗、环境风险、物质循环、经济效益 4 项一级指标结果来看,由于情景 1 是基于传统的锌冶炼工艺,消耗的原辅料和能源物质质量相对较低,其相应的大气与水体环境特征污染物的排放量也相对较低,因此在资源能耗和环境风险评估方面的指标值也相对较高,分别达到 0.0746 和 0.1208。而情景 2 由于增加了“挥发窑-多膛炉”固废资源化工艺,相应的辅料和能源物质投入增多,相比于情景 1,其新增的固废,如铜渣、铜钴渣、银精矿以及硫酸铅渣也未得到充分利用,且废气、废水和固废中的重金属等污染物排放风险还大幅度增加,因此情景 2 资源能耗和环境风险方面的评估值分别低至 0.0381 和 0.0711。而情景 3 在情景 2 基础上又新增锌-铜、锌-铅固废协同资源化工艺,在基本不增加原辅料和能源物质消耗基础上,既充分回收利用了情景 2 新增的 4 种固废,还大幅降低了其重金属等毒害组分造成的环境风险,因此在资源能耗和环境风险方面的评估值较情景 2 又基本提升到了情景 1 的水准,分别达到 0.0777 和 0.0844。

表 4 生态效率评价指标值
Table 4 Evaluation index value of ecological efficiency

目标 Target	一级指标 First level indicators	一级指标权重 First level index weight	二级指标 Secondary indicators	二级指标权重	二级指标标准值		
				Secondary index	Standard value of secondary index		
				index weight	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3
生态效率综合评价指数(A) Comprehensive evaluation index of ecological efficiency(A)	资源能耗指标(B ₁)	0.1464	单位产品原料消耗(C ₁)	0.0393	0.0000	0.5361	1.0000
			单位产品辅料消耗(C ₂)	0.0188	1.0000	0.3368	0.0000
			单位产品综合能耗(C ₃)	0.0558	1.0000	0.0000	0.1051
			单位产品新鲜水耗(C ₄)	0.0325	0.0000	0.3289	1.0000
	环境风险指标(B ₂)	0.2052	废水特征污染物排放量(C ₅)	0.0535	1.0000	0.7363	0.0000
			废气特征污染物排放量(C ₆)	0.0673	1.0000	0.0486	0.0000
			固废特征污染物排放量(C ₇)	0.0844	0.0000	0.3370	1.0000
	物质循环指标(B ₃)	0.3704	固废综合回收利用率(C ₈)	0.2469	0.0000	0.9286	1.0000
			目标金属元素回收利用率(C ₉)	0.1235	0.0000	0.6222	1.0000
	经济效益指标(B ₄)	0.2780	主要资源产出率(C ₁₀)	0.1525	0.0000	0.7217	1.0000
			固定资产投资额(C ₁₁)	0.0669	1.0000	0.0721	0.0000
			利润总额(C ₁₂)	0.0586	0.0000	0.8270	1.0000
权重合计		1.0000	1.0000				

在物质循环和经济效益两项指标层面上,情景 2 通过增加“挥发窑-多膛炉”固废资源化工艺回收了 Zn、Cd、Ag 等大量有价金属,两项指标相较情景 1 分别提升了 306.1% 和 144.2%;情景 3 通过增加锌-铜、锌-铅固废协同资源化工艺继续回收了 Cu、Pb、Zn 等有价金属,两项指标较情景 2 又分别提升了 21.1% 和 29.2%。因此,在锌冶炼固废内部循环利用基础上继续强化铜铅锌基地内不同冶炼固废的协同冶炼,消纳园区内堆存的大量固废,即回收了其中的有价金属元素,减少原辅料的消耗使用,降低生产成本,又削减了固废末端处理的成本开支,达到了有色冶炼降本增效的最优目标。

3.2 生态效率综合评价指数分析

综合各级评价指标数据结果,同时考虑不同情景的生态效率评价指标之间存在多样权衡关系,计算得出不同情景模式下的生态效率综合评价指数,如图 8 所示。

可以看出,情景 3 固废协同利用模式综合评价指数达 0.2246,生态效率最优,相较于情景 2 固废内部循环模式提升近 25.5%,而情景 1 固废直接处理模式的生态效率综合评价指数最低,仅为 0.0543。综合来看,情景 3 由于新增“铜铅锌综合冶炼固废协同资源化处理工艺”,有利于工业园区内部企业之间固废的协同转化。其中,锌冶炼系统所产出的铅渣、浮选银精矿及铜渣等均可就近转运,减少运输损耗成本,同时优化了生产要素,提高投入性资源的利用率,减少冗余量,降低园区内三废污染物的排放,提高了固废中 Cu、Pb、Zn、Cd、In 有价金属元素的回收利用率,降低了固废中 Cd、Hg、As 等毒害元素的区域环境释放风险。

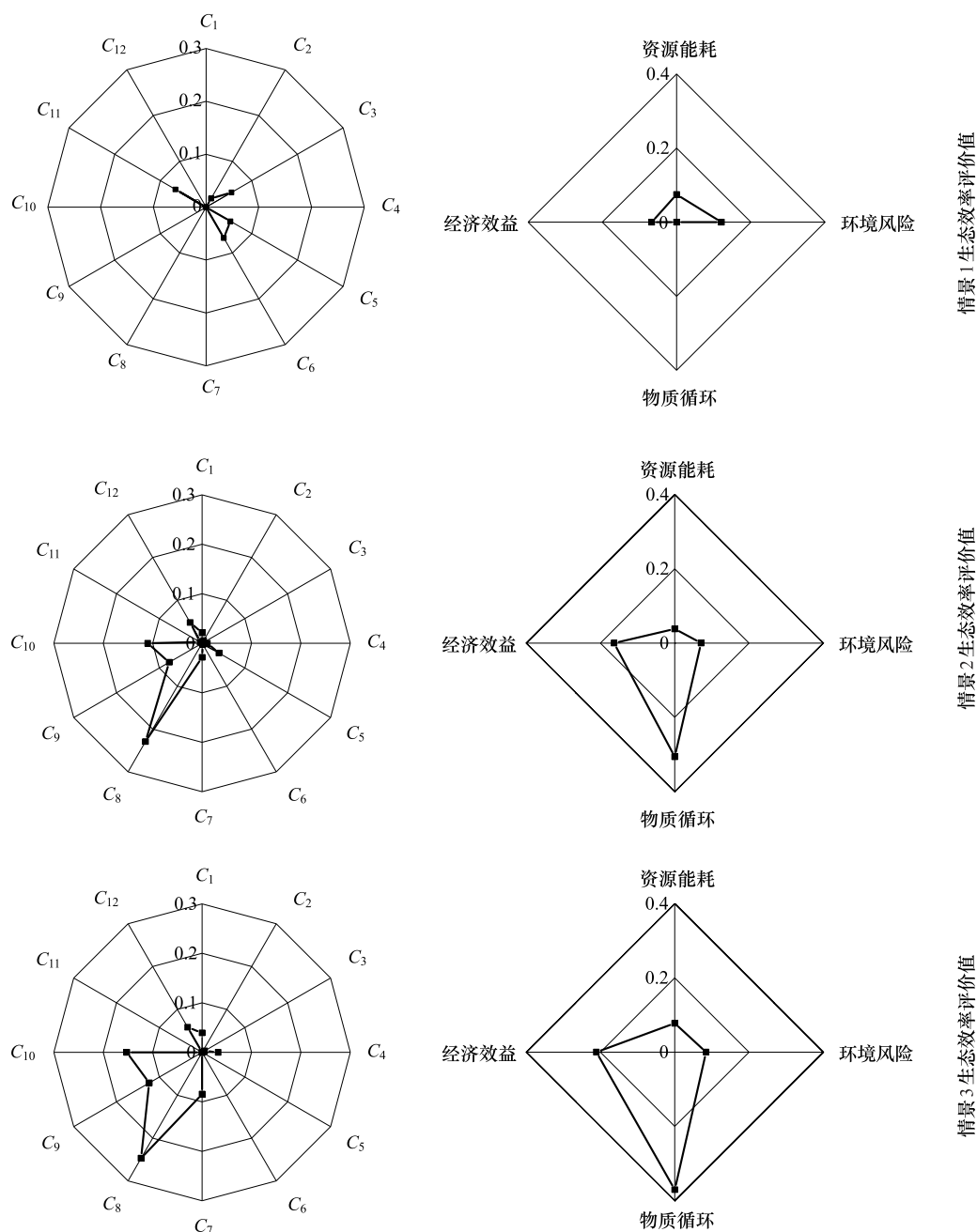


图7 不同情景生态效率一、二级指标评价价值

Fig.7 Evaluation value of primary and secondary indicators of ecological efficiency in different scenarios

C₁: 单位产品原料消耗; C₂: 单位产品辅料消耗; C₃: 单位产品综合能耗; C₄: 单位产品新鲜水耗; C₅: 废水特征污染物排放量; C₆: 废气特征污染物排放量; C₇: 固废特征污染物排放量; C₈: 固废综合回收利用率; C₉: 目标金属元素回收利用率; C₁₀: 主要资源产出率; C₁₁: 固定资产投资额; C₁₂: 利润总额

4 结论

本研究结合物质投入产出分析法、层次分析法与熵值法构建了铜铅锌基地固废综合利用生态效率评价方法与指标体系,探究了直接处理、内部循环和协同利用三种不同锌冶炼固废处置情景模式下的生态效率对比情况。生态效率二级指标评价结果表明:从情景1到情景3,在原料锌精矿消耗量不变的前提下,辅料消耗与

新鲜水耗均呈略微递增趋势,总能耗与单位产品能耗情景 2 和情景 3 则显著高于情景 1,分别增加了近 89.1% 和 79.7%。与此同时,在废水废气排放方面,情景 2 和情景 3 与情景 1 相比,虽然重金属及氟氯离子污染物排放含量略微增长,但在固废环境风险上,递减效益显著。其中,情景 2 对锌冶炼活性炭渣、钙镁渣、高镉渣及尾矿渣等近 28.3 万 t/a 的固废进行了综合回收,固废综合回收利用率高达 90.7%,同时节省了危废处置成本近 50000 万元/a。在此基础上,情景 3 又进一步回收了固废中的 Cu、Zn、Pb 三种有价金属,金属总回收率达到 97.2%,主要资源产出率也高出情景 210.9%。

三种情景模式综合生态效率评价结果表明:情景 3 即铜铅锌基地协同冶炼模式下,锌冶炼系统固废综合利用生态效率最佳,生态效率综合评估值达到 0.2246,与情景 2 相比更具经济与环境优势;与情景 1 相比,情景 3 虽然在物料能源消耗与区域大气环境毒害风险两个方面有所增加,但其综合物质能耗和环境风险仍和情景 1 基本维持在同一水平上,并且在固废二次资源综合利用和经济效益方面优势更加明显。

总体来看,锌冶炼系统生态效率的提升得益于企业产出的固废处置效率和规模提升的综合作用,考虑到锌冶炼实际生产情况,增强其与基地内铜、铅系统间协同转化,提高资源利用效率,减少资源能源消耗和环境污染排放,增强固废消纳与物质转换能力是实现企业清洁生产目标的重要举措,也是提高铜铅锌基地或园区生态效率的最佳策略途径。因此,湿法炼锌企业在今后发展过程中,应充分认识到与其所在区域或工业园区内固废协同利用一体化的重要性,加大对协同工业园区的投入,鼓励大宗固废区域内及区域之间协同消纳,实现原生产业与综合回收利用产业之间的协同发展。

参考文献 (References):

- [1] 朱军,李维亮,刘曼博,康敏,赵成,崔旭东. 锌湿法冶炼渣的污染物分析及综合利用技术. 矿产综合利用, 2020, 41(4): 59-65.
- [2] 施志伟. 我国固废危废处理现状及对策建议分析. 资源节约与环保, 2020, 40(5): 131-131.
- [3] 阎赞,王想,徐名特,王闻单,周春生. 尾矿资源化研究在铅锌尾矿中的应用. 矿产综合利用, 2017, 38(1): 1-5.
- [4] Newman P W G. Sustainability and cities: extending the metabolism model. Landscape and Urban Planning, 1999, 44(4): 219-226.
- [5] Wan H K, Mu D, Peng M. Research on the sustainable development of copper metallurgy chain. 2013 International Conference on Management Science and Engineering 20th Annual Conference Proceedings. July 17-19, 2013, Harbin: IEEE, China. 2013: 1161-1167.
- [6] Huang Q, Chen G W, Wang Y F, Xu L X, Chen W Q. Identifying the socioeconomic drivers of solid waste recycling in China for the period 2005-2017. Science of the Total Environment, 2020, 725: 138137-138148.
- [7] 赵薇. 基于准动态生态效率分析的可持续城市生活垃圾管理[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [8] 吕彬,杨建新. 中国电子废物回收处理体系的生态效率分析. 环境工程学报, 2010, 4(1): 183-188.
- [9] 岳强,王鹤鸣,陆钟武. 基于总物流分析的我国钢铁工业生态效率分析. 环境科学研究, 2014, 27(8): 915-921.
- [10] 毛玉如,沈鹏,孙启宏,李艳萍,王颖茹. 铝工业产业共生和提高生态效率研究//2008 中国环境科学学会学术年会优秀论文集(中卷). 北京: 中国环境科学学会, 2008: 617-620.
- [11] 黄锡生,徐本鑫. 生态效率视角下建筑废弃物减排与利用的法律规制. 城市发展研究, 2011, 18(9): 90-94.
- [12] 贾冯睿,郎晨,刘广鑫,孙琪,马丹竹,岳强. 基于物质流分析的中国金属铜资源生态效率研究. 资源科学, 2018, 40(9): 1706-1715.
- [13] 张海涛,王如松,胡聃,张云. 煤矿固废资源化利用的生态效率与碳减排——以淮北市为例. 生态学报, 2011, 31(19): 5638-5645.
- [14] Cudjoe D, Wang H, Zhu B Z. Assessment of the potential energy and environmental benefits of solid waste recycling in China. Journal of Environmental Management, 2021, 295: 113072-113079.

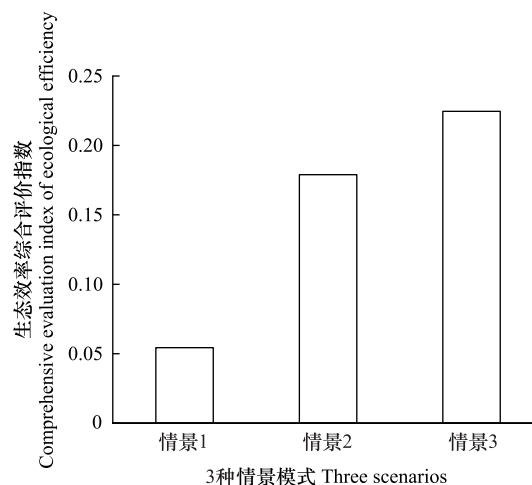


图 8 不同情景生态效率综合评价指数

Fig.8 Comprehensive evaluation index of ecological efficiency in different scenarios

- [15] 梁进社, 郑蔚, 蔡建明. 中国能源消费增长的分解——基于投入产出方法. 自然资源学报, 2007, 22(6): 853-864.
- [16] 王玉潜. 基于投入产出方法的能源消耗强度因素模型. 中南财经政法大学学报, 2005, (6): 34-38.
- [17] 赵贺春, 张立娜. 我国铝业生产的物质流分析——基于 2010 年我国铝行业的数据. 北方工业大学学报, 2014, 26(4): 1-8.
- [18] 姜文英. 典型铅锌冶炼企业循环经济建设物质流分析方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [19] 吴清茹, 王书肖, 王祖光, 李克. 锌回转窑处理浸出渣过程汞排放特征研究. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2513-2519.
- [20] 肖康, 张传福. 锌浸出渣挥发窑处理系统的优化. 中国有色冶金, 2004, 33(6): 32-34, 3.
- [21] 曾子高, 窦传龙, 刘卫平, 习兴梅, 肖松文. 氧化锌烟灰多膛炉脱卤焙烧的效果强化研究. 矿冶工程, 2007, 27(1): 54-56.
- [22] 中国恩菲工程技术有限公司. 五矿有色金属控股有限公司铜铅锌产业基地项目环境影响报告书. 北京: 中国恩菲工程技术有限公司, 2017.
- [23] 株洲冶炼集团股份有限公司. 株洲冶炼集团股份有限公司 2019 年度报告. 长沙: 株洲冶炼集团, 2019.
- [24] Chen X, Lin B Q. Assessment of eco-efficiency change considering energy and environment: a study of China's non-ferrous metals industry. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123388.
- [25] Zhang R R, Ma X T, Shen X X, Zhai Y J, Zhang T Z, Ji C X, Hong J L. Life cycle assessment of electrolytic manganese metal production. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119951.
- [26] Jang Y C, Lee G, Kwon Y, Lim J H, Jeong J H. Recycling and management practices of plastic packaging waste towards a circular economy in South Korea. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 158: 104798.
- [27] Vendrell-Puigmitja L, Abril M, Proia L, Espinosa Angona C, Ricart M, Oatley-Radcliffe D L, Williams P M, Zanain M, Llenas L. Assessing the effects of metal mining effluents on freshwater ecosystems using biofilm as an ecological indicator: comparison between nanofiltration and nanofiltration with electrocoagulation treatment technologies. Ecological Indicators, 2020, 113: 106213.
- [28] Razzaq A, Sharif A, Najmi A, Tseng M L, Lim M K. Dynamic and causality interrelationships from municipal solid waste recycling to economic growth, carbon emissions and energy efficiency using a novel bootstrapping autoregressive distributed lag. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 166: 105372.
- [29] Lassesson H, Malovany A, Andersson A. Optimizing resource flow of industrial processes, with a case study of zero liquid discharge at a copper smelting plant. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 125452.
- [30] 田炯, 王翠然, 陆根法. 层次分析法在生态效率评价中的应用研究. 环境保护科学, 2009, 35(1): 118-120.
- [31] 谢琨. 钢铁企业生态效率指标构建研究//中国会计学会环境会计专业委员会 2011 学术年会论文集. 北京: 中国会计学会, 2011: 446-452.
- [32] 谢琨, 刘思峰. 基于灰色评估的钢铁企业生态效率评价. 生态经济, 2016, 32(5): 111-116, 142-142.
- [33] 周国梅, 彭昊, 曹凤中. 循环经济和工业生态效率指标体系. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 201-203.
- [34] 张思锋, 李灿. 生态工业园的生态效率评价体系构建及应用. 新西部: 下半月, 2008, (10): 83-86.
- [35] Kheybari S, Rezaie F M, Naji S A, Najafi F. Evaluation of energy production technologies from biomass using analytical hierarchy process: the case of Iran. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 257-265.
- [36] Stefanovic' G, Milutinovic' B, Vučićević B, Denčić-Mihajlov K, Turanjanin V. A comparison of the Analytic Hierarchy Process and the Analysis and Synthesis of Parameters under Information Deficiency method for assessing the sustainability of waste management scenarios. Journal of Cleaner Production, 2016, 130: 155-165.
- [37] 谷秀兰, 黄朝明, 栾乔林, 韦仕川. 基于熵值法的县域耕地利用效益定量评价. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 533-537.
- [38] Masotta M, Rocchi I, Pazzagli G, D'Ambrosio R, Seggiani M. Recovery of sulfur from sulfur-rich filter cakes in a rotary kiln: process optimization. Waste Management, 2021, 126: 567-577.
- [39] Wang J, Zhang Y Y, Cui K K, Fu T, Gao J J, Hussain S, AlGarni T S. Pyrometallurgical recovery of zinc and valuable metals from electric arc furnace dust: A review. Journal of Cleaner Production, 2021, 298: 126788.
- [40] 国家发展改革委, 财政部, 环境保护部, 国家统计局. 发展改革委关于印发《循环经济发展评价指标体系(2017 年版)》的通知. 北京: 国家发展改革委, 财政部, 环境保护部, 国家统计局, 2017.