

全生命周期视角下我国关键金属循环利用的 环境影响和成本效应研究 ——以废旧手机为例

何朋蔚¹, 彭亚山¹, 潘咏怀¹, 冯海波²

(1. 上海理工大学管理学院, 上海, 200093;

2. 不列颠哥伦比亚大学森林学院, 温哥华, V6T 1Z4)

摘要: 随着国际竞争的日益加剧, 关键金属资源供应链安全已成为重要的国家战略议题。废旧手机中关键金属的循环利用, 不仅能够有效缓解环境压力, 也是保障资源安全供应的重要途径。基于生命周期评价法(LCA)与生命周期成本法(LCC), 利用国内外相关文献、行业报告及数据库资料, 对我国废旧手机中关键金属回收利用的环境影响与经济成本进行定量分析与对比, 构建从废旧手机回收材料提炼及最终处置的全生命周期分析框架, 引入模糊模型以降低数据的不确定性。研究发现, 相较于废旧功能手机, 废旧智能手机关键金属回收过程的环境影响更为显著; 以废旧手机回收金属替代原生关键金属资源在环境保护方面更具优势; 废旧智能手机的回收处理成本虽高于废旧功能手机, 但其所含关键金属的回收价值亦更高。因此, 推动废旧手机, 尤其是废旧智能手机的回收利用, 并提高关键金属的回收效率, 不仅能带来显著的环境效益, 也能创造可观的经济收益。

关键词: 生命周期; 废旧手机; 关键金属; 循环利用; 供应链安全

中图分类号: F426

文献标识码: A

文章编号: 1672-3104(2025)04-0128-15

关键金属是指对低碳能源转型、战略性新兴产业和国防军事需求等至关重要但面临较大供应风险, 同时又被打上地缘政治烙印的一类金属^[1-3]。美国有 41 种关键金属对外依存度大于 50%^[4]; 中国对外依存度超过 50%的金属多达 12 种, 其中超过 90%的有 6 种^[2]。随着大国竞争的不断加剧, 关键金属供应链安全已成为全球地缘政治经济竞争的前沿领域^[5], 主要竞争大国已将关键金属供应链安全上升为国家战略进行重点布局^[6]。美国、欧盟、日本等发达经济体开始调整关键金属资源战略, 视中国为主要竞争对手, 正试图构建“去中国化”的关键金属资源联盟, 加强自身关键金属供应链安全^[3,7-8]。关键金属资源供应链安全不仅涉及上游的资源供给安全, 还包括下游的回收利用和环境安全^[9]。为确保关键金属资源供应链安全, 循环利用已成为保障关键金属供应安全和减少环境影响的重要补充和必要手段, 被提升至战略高度^[8,10]。例如, 为保障欧盟的关键金属供应链安全, 欧盟理事会于 2024 年 3 月 18 日通过了《关键原材料法案》, 该法案称, 在 2030 年前, 欧盟每年关键金属 25% 的消耗量将来自回收利用^[11]。

收稿日期: 2024-06-09; **修回日期:** 2025-03-23

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“我国深海战略性资源勘探开发政策研究”(23&ZD106); 国家社会科学基金重大项目“地缘政治突发事件对我国战略性矿产资源产业链供应安全影响的机理和对策研究”(22&ZD098); 上海市科学技术委员会软科学研究项目“基于价值核算的上海市工业固废资源化协同治理的补偿机制研究”(24692109700)

作者简介: 何朋蔚, 男, 广东兴宁人, 上海理工大学管理学院讲师, 主要研究方向: 资源环境管理, 联系邮箱: hepengweihn@163.com; 彭亚山, 男, 湖南衡阳人, 上海理工大学管理学院硕士研究生, 主要研究方向: 资源环境管理; 潘咏怀, 女, 安徽黄山人, 上海理工大学管理学院硕士研究生, 主要研究方向: 工商管理; 冯海波, 男, 湖北武汉人, 不列颠哥伦比亚大学森林学院助理教授, 主要研究方向: 绿色建筑与生命周期评价

随着工业化和城市化的迅速发展, 中国已于 2004 年成为全球最大的手机制造和消费国^[12]。手机的普及、快速更新和短寿命导致我国每年产生大量废旧手机。据中国循环经济协会估算, 废旧手机存量超过 20 亿部^[13]。废旧手机中含有丰富的金、银、铜、钯等关键金属, 但回收处理过程也可能对环境造成影响^[14]。研究表明, 到 2035 年, 中国废旧手机中可回收的关键金属将超过 9.39 万吨^[15]。由于功能手机和智能手机中关键金属的种类、品位及资源可供性存在明显差异^[16], 本文将分别研究废旧功能手机和废旧智能手机中关键金属循环利用的环境影响和经济效益。

国内外学者关于废旧手机的研究主要集中在以下三个方面: (1)废旧手机的生命周期评估^[18-20]或生命周期成本分析^[12]; (2)废旧手机的数量^[15,20-21]、经济性^[22-24]和管理^[25-27]; (3)废旧手机内含的金属构成^[28-34]。其中, 关于废旧手机生命周期评价法(Life cycle assessment, LCA)或生命周期成本分析(Life cycle cost analysis, LCCA)的代表性研究为: Cordella 等利用生命周期评估模型, 分析欧洲实施不同材料效率战略情景下智能手机的碳足迹^[17]; Wiche 等对智利的一款翻新高端智能手机进行了完整的使用寿命分析以了解其对环境的影响^[18]; He 等利用生命周期成本分析法揭示了中国废旧手机回收以及其中所含高技术矿产的情况^[12]。关于废旧手机的数量、经济性和管理的研究在不同国家具有各异的情况。例如, Li 等利用修订后的销售和用户数据估算了中国废旧手机的产量^[20]; Bruno 等分析了手机材料构成对人工拆解手机经济效益的影响^[22]; Gómez 等研究了废旧手机中关键金属回收的潜在经济价值^[23]; 倪明等研究了驱动废旧手机回收的路径, 并绘制了消费者-回收企业-政府多方联动施策图^[26]; Ghanadpour 等揭示了社交媒体数据在管理废旧手机方面的重要性^[27]。关于废旧手机内含金属构成的研究, 主要分为传统金属和高技术金属两方面。例如, Guo 等通过物质流方法, 分析了废旧手机中的金属存量, 并发现废旧手机是典型的二次金属资源蓄积地, 尤其是关键金属^[33]; Chen 等绘制了中国废旧手机中高技术矿产的社会存量和时空分布图^[28]; He 等基于智能手机和功能手机的差异, 分析了印度废旧手机中高技术金属的存量^[29]; Kastanaki 等预测了希腊废旧功能手机和智能手机中关键金属的存量^[33]。

尽管已有大量研究强调了废旧手机在资源回收与环境保护等方面的重要性, 但将生命周期评价法与生命周期成本法相结合以评估关键金属循环利用的研究仍相对较少。二者的结合分析具有重要的理论与实践意义。一方面, 生命周期评价法能够系统评估关键金属循环利用全过程对环境的影响, 为相关政策的制定和技术优化提供科学依据; 另一方面, 生命周期成本法则从经济视角揭示循环利用所涉及的成本结构与经济效益。通过协同运用这两种方法, 不仅可以更全面地衡量关键金属资源的可持续性, 还能够为优化回收技术、提高经济效益提供指导。这对于促进关键金属资源的高效循环利用、减少环境负担以及保障关键金属资源供应链的稳定性和安全性至关重要。此外, 现有研究在研究对象界定与方法选择方面亦存在一定局限: 一方面, 许多研究未对功能手机与智能手机进行类别区分, 而是将其作为统一对象进行分析, 影响了估算结果的准确性; 另一方面, 尽管一些学者对废旧手机的类别进行了区分, 但他们的研究方法也局限于生命周期评价法或生命周期成本法, 鲜有研究将两者结合起来进行综合分析。综上所述, 本文尝试将生命周期评价法与生命周期成本法相结合, 在考虑从废旧手机回收、拆解至处置的完整物质流基础上, 基于手机类型的差异化, 对其中关键金属的循环利用进行环境与经济双重维度的系统分析。一方面评估其对环境的影响, 另一方面探讨其经济效益。进而, 从促进资源高效利用和环境负担减轻的角度出发, 提出保障我国关键金属供应链安全的相关政策建议, 并对未来研究方向进行展望。

一、研究方法

(一) 目标与范围定义

研究采用生命周期评价法和生命周期成本法, 量化废旧手机及其中所含关键金属的环境影响和成

本效应。生命周期评价法是一种衡量和比较人类活动对环境影响的方法,以实现人类社会的可持续发展为目标^[35]。环境影响指的是人类活动对环境产生的各种影响,包括资源消耗、排放到环境中的物质和能量,以及其他干预措施对环境造成的影响。这些影响还考虑了资源提取过程、材料、制造、消费和生命周期末端(如生产过程中的重复利用、回收和处置)等因素。而生命周期成本法用于评估不同过程的经济性能,以便在整个生命周期中构建每个过程的成本投入,并加强其在可接受资本化方面的功能。同时,手机的组件或材料会因不同型号和品牌而存在差异。因此,本研究选择了多个不同品牌和型号的废旧手机作为研究对象。通过对生命周期环境影响和生命周期成本效应开展量化分析,行业管理者可以确定适当的回收废旧手机和其中关键金属的管理方法,该方法对我国关键金属资源循环利用和关键金属资源供应链安全水平提升具有一定的促进作用。

1. 功能单元

功能单位被定义为一台废旧功能手机和一台废旧智能手机。根据相关文献研究^[36-37],一台废旧功能手机和废旧智能手机的单位重量分别为:最小重量值 37.13 克,最可能的重量值 51.79 克,最大重量值 67.44 克;最小重量值 51.86 克,最可能的重量值 72.82 克,最大重量值 112.9 克。此外,一台功能手机和智能手机中包括金属线的印刷电路板(Printed circuit boards, PCB)值分别为:最小值 6.47 克,最可能的值 13.34 克,最大值 19.87 克;最小值 9.46 克,最可能的值 13.77 克,最大值 16.68 克^①。

2. 系统边界

无论是生命周期评价法还是生命周期成本法,都需要确定研究的系统边界。对于生命周期评价,回收过程开始于手机使用寿命的终结。整个回收过程从手机收集阶段开始,通过将废旧手机送至机械拆解厂,并最终完成材料处置过程。其中涉及五个物质流阶段:收集阶段、运输阶段、拆解阶段、提炼阶段和处置阶段(见图 1)。在大多数有关电子废弃物管理的生命周期评价研究中,由于数据难以获取或对整个过程影响相对较小,通常不考虑收集过程中所产生的环境影响。然而,鉴于废旧手机的差异化,本研究将手机收集阶段的生命周期评价纳入考量。此外,由于研究的目标是量化两种不同类型废旧手机回收所造成的总体环境影响,而非估计特定时间范围内的整个生命周期影响,因此并未考虑生命周期评价的时间范围。

对于生命周期成本分析来说,废旧手机的处理成本主要由收集、机械拆解、材料提炼和材料处置等费用组成^[12]。这些费用往往可以单独计算并相互独立,然后求和得到总成本^[38]。如图 1 所示,关键金属从已完成生命周期的各类手机进入收集阶段,并被运送到拆解设施进行材料提炼。在提炼和处置阶段完成之后,这些废旧手机中所含的关键金属最终可以被回收利用。

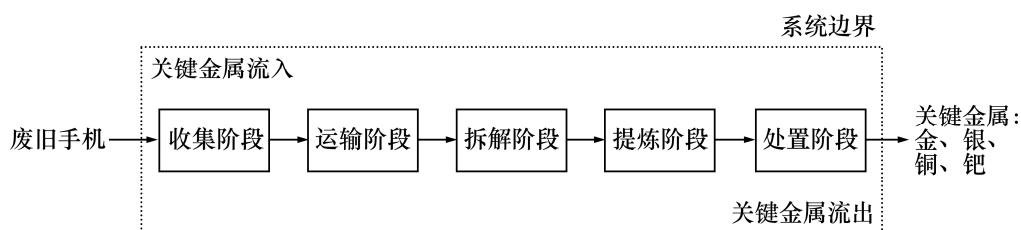


图 1 废旧手机中关键金属的物质流程图

(二) 生命周期清单

系统边界界定主要包括收集阶段、运输阶段、拆解阶段、提炼阶段和处置阶段,在这些环节的基础上,每种类型的手机所需的输入数据主要来自装配基地和相关文献。此外,一些废旧手机收集和拆解的清单数据来自回收行业报告或回收企业的官方网站。例如,拆解阶段中废旧功能手机的机械拆解

影响方面, 本文应用了 Tan 等和 Sinsh 等研究中一台废旧功能手机的单元重量信息^[36-37]和 Ecoinvent 3.3 数据库中的 PCB 粉碎机分数信息; 材料提炼阶段中废旧手机的单元重量信息来自 Tan 等和 Sinsh 等的研究数据^[36-37], 废旧手机中金、银、铜这三种金属材料的处理信息来自 Ecoinvent 3.3 数据库, 钪的处置信息由金进行代理换算等。后文将对物质流模型的各阶段进行详细描述。

1. 收集

评估收集过程的环境影响所需数据来自 Ecoinvent 3.3 数据库和本地的行业报告。在中国情境下, 废旧手机的收集过程主要包括三个主要步骤: (1)顾客到收集站; (2)收集站到二手市场; (3)二手市场到拆解中心。由于收集站大多位于居民区附近, 因此第一步的收集距离可以忽略不计。第二步是从各个收集站到二手市场的收集距离。以北京市为例, 主要的运输方式是通过轻型商用车, 第二步的预估收集距离约为 7 千米至 12 千米^[39-40]。第三步是从二手市场到拆解中心的收集距离。同样以北京市为例, 全国各地的大部分电子废弃物将被运送到深圳的二手市场^[40]。因此, 主要的运输方式将是卡车, 第三步的预估收集距离约为 2 175 千米至 2 239 千米。

评估收集阶段的经济影响的研究数据主要来源于相关文献^[12,15,41-42]、官方行业网站^[43]和问卷调查。考虑到高技术金属与关键金属之间的相似性, 将城市矿产回收金的回收成本用作从废旧手机中回收各种关键金属的代理成本^[12,41]。这种近似是因为关于从废旧手机中提炼关键金属的数据有限^[12]。中国废旧手机的数量以及它们所含各种关键金属的数据来自前人的相关研究^[15,42]。人民币兑美元的汇率取自中国银行网站(2024 年)。关键金属的市场价格以 2024 年 4 月 8 日的数据表示, 数据来自上海金属网^②[43]。

上述生命周期成本分析研究涉及多个数据来源, 所需数据以标准格式进行收集, 分别表示最小值、最可能值和最大值。然后, 通过应用模糊模型来降低不确定性。其他四个阶段的成本值被用于模糊模型^③。

2. 机械拆解

评估废旧手机机械拆解的环境影响所需的数据来自 Ecoinvent 3.3 数据库和相关研究文献。在废旧功能手机的机械拆解影响方面, 本文应用了 Tan 等和 Sinsh 等研究中一台废旧功能手机的单元重量信息^[36-37]和 Ecoinvent 3.3 数据库中的 PCB 粉碎机分数信息。关于废旧智能手机的机械拆解影响, 同样使用了 Tan 等和 Sinsh 等研究中一台废旧智能手机的单元重量信息^[36-37]和 Ecoinvent 3.3 数据库中的 PCB 粉碎机分数信息。此外, 用于评估机械拆解的生命周期清单与机械设备排放有关。在这种情况下, 本研究没有考虑劳动的生态效应。

3. 材料提炼

评估材料提炼的环境影响所需的数据来自 Ecoinvent 3.3 数据库和相关研究文献。本研究仅考虑金、银、铜和钪这四种材料。废旧手机的单元重量信息来自 Tan 等和 Sinsh 等的研究^[36-37], 废旧手机中金、银、铜这三种金属材料的处理信息来自 Ecoinvent 3.3 数据库, 钪的处理信息由金进行代理。此外, 这三种金属材料的生产信息也来自 Ecoinvent 3.3 数据库。上述数据对于分析原材料的替代效应十分必要。废旧电池处置过程中产生的排放, 与原材料提炼过程以及原材料替代所引发的排放密切相关。

4. 材料处置

评估材料处置的环境影响所需的数据来自 Ecoinvent 3.3 数据库和相关研究文献。在废旧手机的塑料回收、屏幕回收和电池处置方面, 本研究采用了一台废旧手机的单位重量信息, 该信息来自 Tan 等和 Sinsh 等的研究^[36-37], 以及 Ecoinvent 3.3 数据库中的塑料制造、屏幕制造和电池处置信息。研究发现: 一台废旧功能手机中塑料的百分比约为 47%, 而一台废旧智能手机中塑料的百分比约为 37%; 一台废旧功能手机中屏幕玻璃的百分比约为 10%, 而一台废旧智能手机中屏幕玻璃的百分比约为

14%；一台废旧功能手机中电池的重量为 16 克至 42 克，而一台废旧智能手机中电池的重量为 19 克至 48 克^[36-37]。此外，塑料回收的主要排放与塑料制造有关；屏幕玻璃回收的主要排放与玻璃制造有关；电池处置的主要排放与废旧手机的电池处理有关。

在材料处置环节中，当计算废旧手机中关键金属回收所产生的温室气体排放时，将废旧手机的塑料回收、屏幕回收和电池处置方面所产生的温室气体排放一并考虑。本研究并未精确到废旧手机中回收关键金属这一类材料所产生的温室气体排放，而是将占废旧手机主要部分的塑料、屏幕和电池等材料的回收与关键金属回收作为一个整体来进行分析，将这三类材料回收和处置产生的温室气体排放视为关键金属回收的伴生排放。这一做法主要基于以下考虑：从经济人假设(追求自身利益或效用的最大化)来看，回收企业出于利益最大化的，在回收废旧手机中的关键金属时，会伴生回收和处置这三类低价值但有利可图的材料；倘若回收企业不回收废旧手机中的关键金属，或将不会考虑去回收废旧手机中的塑料、屏幕和电池等材料。因此，本研究将废旧手机的塑料、屏幕和电池这三类材料的处置视为与关键金属回收绑定的伴生回收环节，视这三类材料的回收处置产生的温室气体排放为关键金属回收的伴生排放。

综上所述，本研究认为将这部分材料处置产生的温室气体排放包含在废旧手机中关键金属回收的温室气体排放之内具有一定的现实意义。

(三) 生命周期影响评价

本研究采用 SimaPro 8.5.0.0TM 软件，结合 ReCiPe H 中期方法来计算全球变暖潜在(GWP)影响。由于手机数据的多样性，生命周期清单分析数据被收集为一个数据组，分别设置了最小值、最可能值和最大值。为了进一步降低数据的不确定性，研究采用 Excel 应用模糊模型。每个模糊模型运行的生命周期影响评估结果将在下文中汇总和呈现。

(四) 生命周期成本分析

1. 废旧手机回收的生命周期成本分析

废旧手机的生命周期成本分析可以通过公式(1)进行估算：

$$LCCA = Cc + Tc + Dc + Rc + D'c \quad (1)$$

其中， $LCCA$ 代表废旧手机的生命周期成本， Cc 代表废旧手机的收集成本， Tc 代表废旧手机的运输成本， Dc 代表废旧手机的拆解成本， Rc 代表废旧手机的提炼成本， $D'c$ 代表废旧手机提炼后的处置成本。

总体而言，生命周期成本分析主要包括五个阶段，这些阶段的数据各不相同。具体来看，收集阶段的模糊模型数据来自中国第一家废旧电子电器回收企业，而其他四个阶段的模糊模型数据则来自先前的文献和问卷调查^[12]。同时，人民币被转换为美元，采用了外汇汇率，见公式(2)：

$$UCc_i = CCc_i \times r_i \quad (2)$$

其中， UCc_i 表示第 i 年手机的收集成本(以美元表示)， CCc_i 表示第 i 年手机的收集成本(以人民币表示)，而 r_i 表示第 i 年美元对人民币的汇率^[12]。基于功能手机和智能手机的区分，废旧手机其他四个阶段的生命周期成本分析具体信息如图 2 所示。

2. 关键金属回收的生命周期成本分析

多种因素可能会显著影响整体回收成本，譬如回收的方式方法、化学试剂的成本和目标金属^[12]。研究假设关键金属的生命周期成本分析仅来自提炼阶段。基于之前的研究，从城市矿产中回收金的回收成本被用作废旧手机中回收各种关键金属的代理成本^[12,41]。利用废旧功能手机和智能手机中关键金属的含量信息，可以估计不同手机中关键金属的生命周期成本。同时，参照 He 等的估算步骤和研究结果^[12]，可以估算功能手机和智能手机中含有的关键金属的生命周期成本^④。

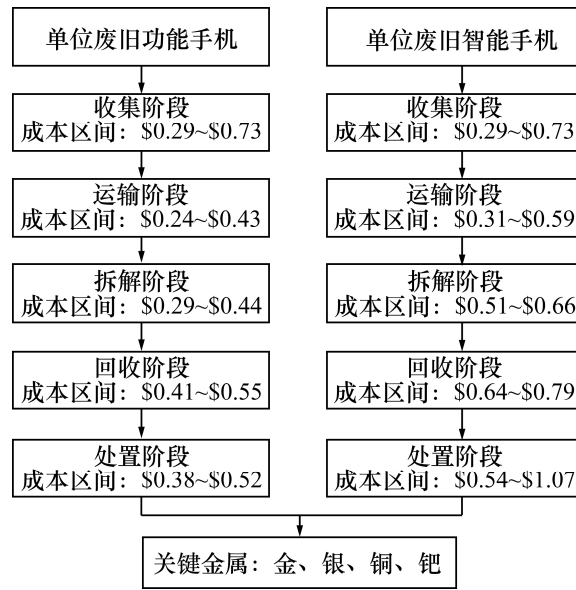


图2 不同类别手机的生命周期成本

(五) 模糊模型

为了简化产品系统存在权衡时的生命周期影响评价,通常会应用加权法。这将需要考虑立法、消费者和货币估值、现有的加权集合以及专家意见。此外,环境影响的规模也需要保持一致。因此,规范化可将影响与参考系统(特定国家、地区或全球)联系起来。

模糊 TOPSIS 模型已成功应用于许多不同的情境。这种直观的决策过程可以很好地展现人类的决策过程^[44-45]。采用这种方法,可以确定最优和最次的情景,并根据负理想解和正理想解之间的距离,从而筛选出表现最优的可行方案^[46-47]。

在模糊 TOPSIS 模型的决策矩阵中,第 i 项技术在第 j 项绩效指标 x_{ij} 下的梯形模糊数被定义为 $x_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ 。

如公式(3)(4)所示, r_{ij} 的归一化值可被定义为通过线性尺度变换,需要最小化的成本标准和需要最大化的效益标准^[48]。

$$r_{ij} = (x_{ij} / c_j^*); \text{ 对于效益标准; 当 } c_j^* = \max_i(c_{ij}) \quad (3)$$

$$\text{i.e. } r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right)$$

$$r_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{x_{ij}} \right); \text{ 对于成本标准; 当 } a_j^- = \min_i(a_{ij}) \quad (4)$$

$$\text{i.e. } r_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right)$$

通过公式(5), 加权归一化决策矩阵的推导如下:

$$v_{ij} = r_{ij}(\cdot)w_j \quad (5)$$

各项指标的正理想解和负理想解如下所示:

模糊正理想解: $A^* = (v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*)$; 其中 v_j^* 是每个属性下最大的 v_{ij} 。

模糊负理想解: $A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-)$; 其中 v_j^- 是每个属性下最小的 v_{ij} 。

对于每个绩效指标,具有最大 d 值的 v_{ij} 是 v_j^* , 具有最小 a 值的是 v_j^- 。正理想解和负理想解之间

的距离如下^[48]:

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}, v_j^*) \tag{6}$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}, v_j^-) \tag{7}$$

公式(8)表示两个梯形模糊数之间的欧氏距离，用于计算每种替代技术相对于 A^* 和 A^- 的距离如公式(6)(7)所示^[48]。

$$d(x_1, x_2) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2]} \tag{8}$$

然后以公式(9)确定相似度系数(CC_i)^[48]。

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-} \tag{9}$$

根据相似度系数(系数越大越好)，对各种替代方案进行排名。

二、研究结果与讨论

(一) 废旧手机中的关键金属回收生命周期评价

如表 1 和图 3 所示，生命周期评价结果表明，智能手机中回收关键金属的总体生命周期影响可能比功能手机更大。功能手机的影响范围为 0.18~0.35 Kg CO₂ eq，而智能手机的影响范围为 -0.05~2.23 Kg CO₂ eq。在智能手机中提取关键金属很可能产生最大的影响，因为相较于功能手机，需要提取更多的金属，如金、银、铜、钯等。

表 1 功能手机和智能手机中关键金属回收的全生命周期环境影响 单位: Kg CO₂ eq

范围	功能手机	智能手机	隶属度
最小值	0.18	-0.05	0
最可能值	0.35	0.66	1
最大值	0.27	2.23	0

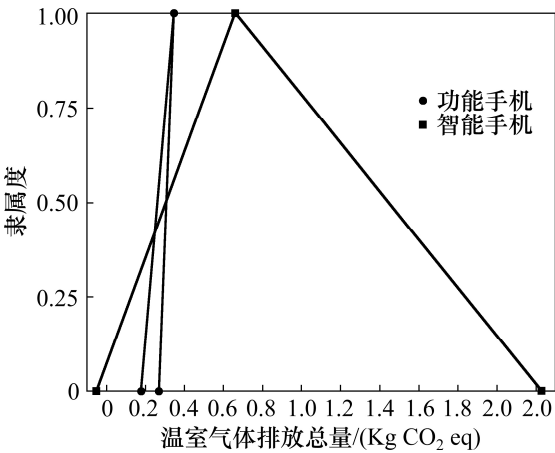


图 3 功能手机和智能手机中关键金属回收的全生命周期环境影响

如表 2 和图 4 所示, 功能手机生命周期评价中最重要的影响因素是提炼影响, 其次是拆解、收集和处置的影响。原材料替代有利于环境保护。功能手机的关键金属替代的环境影响范围为-0.26~-1.38 Kg CO₂ eq, 最可能的值为-0.66 Kg CO₂ eq, 而提炼影响仍然显著, 因为提炼影响包括材料提炼和替换两个方面。

表 2 功能手机中关键金属各回收阶段的环境影响单位: Kg CO₂ eq

范围	收集影响	拆解影响	提炼影响		处置影响	隶属度
			关键金属提炼	关键金属替代		
最小值	0.01	0.04	0.49	-0.26	-0.11	0
最可能值	0.02	0.06	1.10	-0.66	-0.16	1
最大值	0.03	0.08	1.73	-1.38	-0.18	0

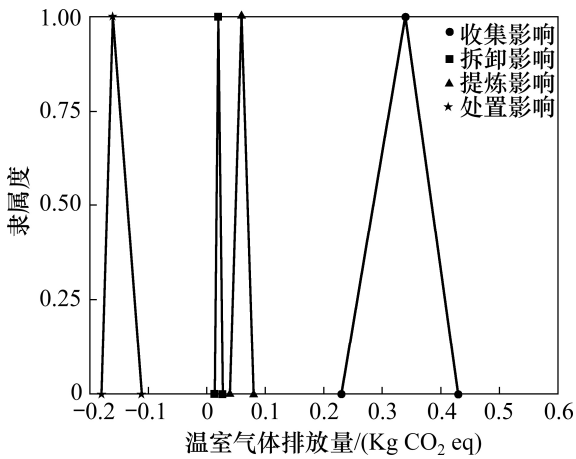


图 4 功能手机中关键金属各回收阶段的环境影响

智能手机各个过程的生命周期影响评估结果如表 3 和图 5 所示。同样, 最大的环境影响来自材料提炼, 范围为-0.01~2.31 Kg CO₂ eq。但原材料替代有利于环境, 智能手机的关键金属替代的环境影响范围为-0.09~-2.58 Kg CO₂ eq, 最可能的值为-0.93 Kg CO₂ eq。需要指出的是, 拆解影响也是显著的。电子废弃物的拆解过程需要耗费大量的能源。在这些过程中, 可再生能源变得重要。因为可再生能源可以减少温室气体的排放, 对自然环境的影响更小。

表 3 智能手机中关键金属各回收阶段的环境影响单位: Kg CO₂ eq

范围	收集影响	拆解影响	提炼影响		处置影响	隶属度
			关键金属提炼	关键金属替代		
最小值	0.02	0.06	0.08	-0.09	-0.12	0
最可能值	0.03	0.08	1.64	-0.93	-0.16	1
最大值	0.05	0.13	4.89	-2.58	-0.25	0

(二) 废旧手机中的关键金属回收生命周期成本效应

研究结果显示, 回收一台废旧功能手机的生命周期成本约为 2.12 美元, 而回收一台废旧智能手机的生命周期成本约为 6.07 美元。提取一台废旧功能手机中的金、银、铜、钯的生命周期成本分别约为

0.043、0.475、19.551、0.038 美元，而提取一台废旧智能手机中的金、银、铜、钯的生命周期成本分别约为 0.072、0.151、51.614、0.019 美元。

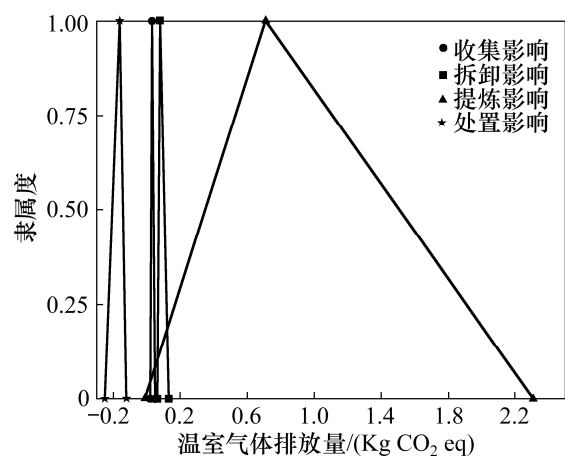


图 5 智能手机中关键金属各回收阶段的环境影响

如表 4 和图 6 所示,智能手机的生命周期成本高于功能手机。回收一台智能手机需要花费 3.64~7.86 美元,而功能手机则较少,为 1.71~2.81 美元。

表 4 回收功能手机和智能手机的生命周期总成本			单位: 美元
范围	功能手机	智能手机	隶属度
最小值	1.71	3.64	0
最可能值	2.12	6.07	1
最大值	2.81	7.86	0

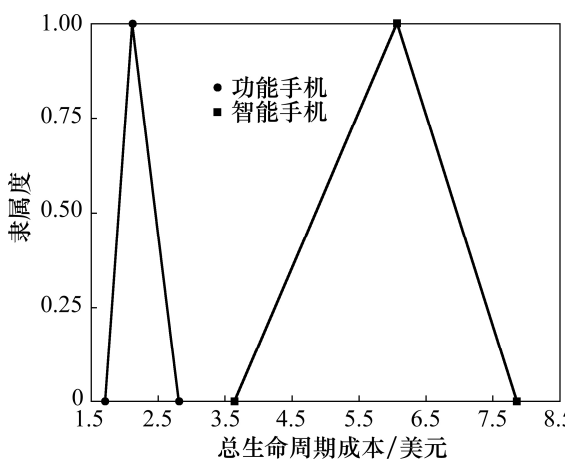


图 6 回收功能手机和智能手机的生命周期总成本

由表 5 和图 7 可知,功能手机生命周期成本中最显著的部分是收集成本,其次是提取、处置和拆解成本。收集成本包括废旧手机的收集和运输两部分。因此,降低交通运输需求对于减少化石燃料的消耗至关重要。

智能手机各个过程的生命周期成本评估结果见表 6 和图 8。同样,最大的成本来自收集成本,范围为 1.86~5.22 美元。处置、提取和拆解的成本也很重要。此外,回收成本还受市场和贸易的影响,

即金属的回收价格会在一段时间内波动。因此，选择合适的分析期至关重要。

表 5 功能手机各回收阶段的生命周期成本					单位：美元
范围	收集成本	拆卸成本	提炼成本	处置成本	隶属度
最小值	0.57	0.31	0.43	0.40	0
最可能值	0.75	0.38	0.51	0.48	1
最大值	1.22	0.46	0.58	0.55	0

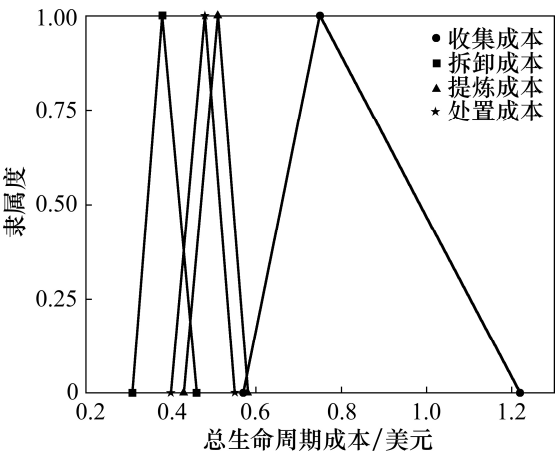


图 7 功能手机各回收阶段的生命周期成本

表 6 智能手机各回收阶段的生命周期成本					单位：美元
	收集成本	拆卸成本	提炼成本	处置成本	隶属度
最小值	1.86	0.54	0.67	0.57	0
最可能值	3.85	0.62	0.75	0.85	1
最大值	5.22	0.69	0.83	1.12	0

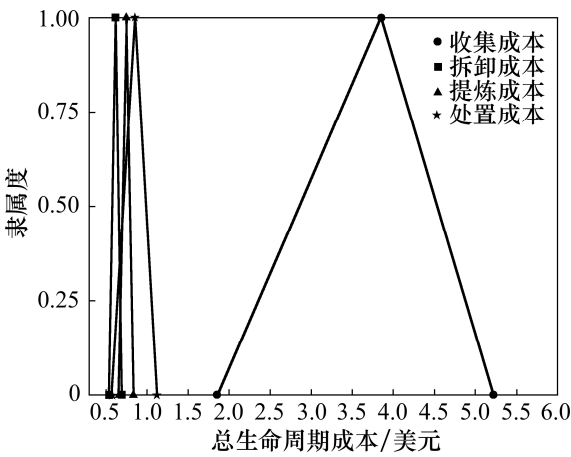


图 8 智能手机各回收阶段的生命周期成本

(三) 进一步讨论

1. 关键金属循环利用的环境效益

关键金属的循环利用对减少其开采及生产阶段的能源消耗和碳排放具有显著作用。已有研究表

明,以原生矿生产钢铁的单位能耗为废钢熔炼工艺的2.5倍,每回收1吨废钢可减少约1.5吨二氧化碳排放量^[10,49]。与原铝生产相比,废铝再生利用可节约95%的能源,每回收1吨废铝可减少16吨二氧化碳排放量^[10,50]。根据中国《“十四五”循环经济发展规划》,到2025年,全国废钢利用量预计达到3.2亿吨,再生有色金属产量达到2000万吨,其中再生铝产量1150万吨^[51]。据测算,同年回收利用3.2亿吨废钢可减少4.8亿吨碳排放,回收利用1150万吨废铝可减少1.84亿吨碳排放。关键金属的循环利用是降低产品全生命周期温室气体排放的重要途径。以锂为例,从动力蓄电池中回收的锂与从智利卤水及澳大利亚矿石中提取的锂相比,其生命周期温室气体排放量分别减少了37%和72%^[52]。本文还发现,通过材料替代实现环境效益十分显著。相关研究估计,1987—2035年,废旧手机中关键金属的替代利用可带来巨大的碳减排潜力。其中,废旧功能手机中关键金属替代的环境影响范围为-69.68万~-369.84万t CO₂ eq,最可能的值为-176.88万t CO₂ eq;废旧智能手机的环境影响范围则为-137.76万~-3949.21万t CO₂ eq,最可能的值为-1423.55万t CO₂ eq。此外,回收每台废旧功能手机和智能手机中关键金属的生命周期环境影响范围分别为0.18~0.35 kg CO₂ eq和-0.05~2.23 kg CO₂ eq,最可能值分别为0.35 kg CO₂ eq和0.66 kg CO₂ eq。从全生命周期视角看,废旧手机关键金属的提炼阶段是温室气体排放的主要来源。因此,通过产品生态设计与技术创新等措施降低关键金属提取难度,减少提取环节环境影响,可进一步减少温室气体排放,提升关键金属循环利用的整体环境效益。

关键金属循环利用不仅能够有效避免二次污染,还能显著降低生态环境修复成本。废旧手机中含有大量重金属等有害物质,若处理不当,将造成土壤退化与水污染,进而对生态系统、生物多样性及人类健康构成威胁^[39,53]。关键金属循环利用具备显著环境优势,将推动各国将其作为确保关键金属供应安全、减少环境影响的重要战略举措^[10]。

2. 关键金属循环利用的经济效益

关键金属循环利用产业的规模正在不断扩大。一方面,低碳能源转型推动关键金属需求显著增长,循环利用关键金属的经济潜力也随之不断提升。国际能源署(IEA)2023年报告指出,在宣布承诺情景(APS)下,到2030年需要累计投入约3.8万亿美元用于清洁能源基础设施和设备建设,以帮助新兴市场及除中国外的发展中经济体实现长期清洁能源目标^[54]。另一方面,随着资源循环型产业体系日趋完善,关键金属循环利用产业产值将显著提高。中国《关于加快废旧物资循环利用体系建设的指导意见》指出,预计到2060年,我国将初步形成社会资源供给主要由“城市矿产”循环利用提供的格局^[39,51]。而关键金属循环利用作为其重要组成部分,产业产值将持续创新高。比较废旧手机中关键金属的生命周期成本与其市场价值,可以为关键金属循环利用和资源供应链安全提供经济效益方面的实证支持。据相关研究测算^[12],从1987—2035年,中国废旧功能手机和智能手机中的关键金属具有明显的经济回收价值。其中,废旧功能手机中金、银、钯的市场价值远高于其生命周期成本,而铜的市场价值则显著低于成本。具体而言,废旧功能手机中金、银、铜、钯的市场价值分别约为399.08亿美元、57.06亿美元、26.39亿美元、170.13亿美元,相应的生命周期成本分别约为1.15亿美元、12.73亿美元、523.99亿美元、1.02亿美元;而废旧智能手机中金、银、铜、钯的市场价值分别约为3798.79亿美元、102.45亿美元、394.00亿美元、485.84亿美元,相应的生命周期成本分别约为11.02亿美元、23.11亿美元、7900.50亿美元、2.91亿美元。由此可见,关键金属循环利用具有显著的经济效益,但需根据实际情况精准实施回收利用。这一巨大经济效益将成为推动关键金属循环利用、保障关键金属资源供应链安全的重要动力。

目前,电子废弃物回收情况并不乐观。中国循环经济协会研究数据显示,约54.2%的废旧手机被消费者闲置留存,仅约5%能够进入专业回收平台、“以旧换新”活动等回收渠道^[13]。较低的回收率严重阻碍了关键金属循环利用经济效益的释放。因此,需要国家、企业和个人的共同努力来提高电子废弃物的回收率,释放巨大的经济效益来驱动关键金属循环利用,从而保障关键金属资源供应链安全。

三、结论、建议与展望

(一) 结论

本研究从全生命周期视角出发, 通过生命周期评价法与生命周期成本法, 分析废旧手机及其关键金属从报废到处置全过程的环境影响和成本效应, 并进一步探讨我国关键金属循环利用的环境影响与成本效应。主要结论如下:

(1) 废旧智能手机关键金属回收过程对环境的影响明显大于废旧功能手机。回收每台废旧功能手机与智能手机中关键金属的生命周期环境影响分别约为 $0.35 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ 和 $0.66 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$; 废旧手机中关键金属替代原生金属具有显著的环境效益, 每台废旧功能手机与智能手机关键金属替代的环境影响分别为 $-0.66 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ 和 $-0.93 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ 。

(2) 废旧智能手机的生命周期成本较高, 但资源回收的潜在价值也更大, 尤其是在铜资源的回收方面。回收一台废旧功能手机与一台废旧智能手机的生命周期成本分别约为 2.12 美元与 6.07 美元; 具体而言, 提取一台废旧功能手机中金、银、铜和钯的生命周期成本分别约为 0.043 美元、0.475 美元、19.551 美元和 0.038 美元, 而提取一台废旧智能手机中这些金属的生命周期成本分别约为 0.072 美元、0.151 美元、51.614 美元和 0.019 美元。

(3) 关键金属循环利用具备显著的环境和经济效益。考虑 1987 年至 2035 年间中国废旧功能手机与废旧智能手机回收情况, 关键金属替代的环境影响分别为 $-176.88 \text{ 万 t CO}_2 \text{ eq}$ 和 $-1423.55 \text{ 万 t CO}_2 \text{ eq}$; 废旧手机中金、银和钯的市场价值远超过其生命周期成本, 但回收率偏低已成为制约关键金属循环利用效益提升的重要因素。

(二) 政策建议

为促进关键金属资源循环利用, 保障我国关键金属资源供应链安全, 本研究提出如下政策建议:

(1) 政府层面, 应加强废旧手机收集与运输环节的基础设施建设, 规范相关操作流程, 提升回收效率并降低回收成本。此外, 应针对具备处理条件但实施效果不佳的企业出台支持性补贴政策, 鼓励有资质的企业积极参与废旧手机或其他电子废弃物的回收与处理。

(2) 企业层面, 生产企业应积极履行生产者责任延伸制度, 实施生态设计, 提升废旧手机的拆解、回收与再利用性能; 回收企业应利用线上线下融合的方式, 拓展回收渠道, 提升回收便利性, 降低收集环节成本; 处理企业则应加强技术创新投入, 提高关键金属的回收效率, 尽可能降低提炼过程的环境影响。

(3) 个人层面, 应增强公众对电子废弃物可持续管理与环境保护的意识。在处理闲置废旧手机时, 公众可将其捐赠或出售给正规回收机构, 而非长期闲置在家中, 避免废旧手机成为潜在的环境负担。这不仅能减少资源浪费, 还能有效推动关键金属的循环利用, 为实现可持续发展做出积极贡献。

(三) 展望

本研究结果可为关键金属资源循环利用与国家关键金属资源供应链安全保障提供环境 and 经济影响方面的数据支撑, 同时为相关政策的科学制定提供理论依据。然而, 本研究仅基于现有处理工艺模型开展评估, 未来新兴的废旧手机处理技术可能存在环境与经济影响方面的不确定性。因此, 后续研究应结合技术进步, 动态更新生命周期清单, 并纳入新的实际操作方法。此外, 当前废旧手机处理过程的统计数据较为有限, 本研究主要采用了文献及数据库中类似组件与工艺的综合数据。未来有必要进行更多实地调研, 降低数据收集过程中的误差与不确定性。最后, 关键金属的循环利用可能重塑关键金属资源的分配格局, 成为新的资源竞争焦点, 未来研究应进一步关注关键金属循环利用对资源供

应链安全的潜在影响。

注释:

- ① 因版面限制,未具体列出,留存备索。
- ② 因版面限制,关键金属的整体市场价格数据留存备索。
- ③ 因版面限制,有关模糊模型模拟结果的详细信息留存备索。
- ④ 因版面限制,具体信息留存备索。

参考文献:

- [1] 吴巧生,周娜,成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1439-1451.
- [2] 陈伟强,汪鹏,钟维琼. 支撑“双碳”目标的关键金属供应挑战与保障对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1577-1585.
- [3] 王安建,袁小晶. 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1550-1559.
- [4] 邢佳韵,陈其慎,龙涛,等. 发达国家战略性矿产安全保障举措及启示[J]. 自然资源情报, 2023(1): 28-36.
- [5] 王永中,万军,陈震. 能源转型背景下关键矿产博弈与中国供应安全[J]. 国际经济评论, 2023(6): 147-176, 8.
- [6] 孙晓蕾,姬强. 进一步提升我国新能源技术全球竞争力[J]. 国家治理, 2023(17): 26-29.
- [7] 李建武,马哲,李鹏远. 美欧关键矿产战略及其对我国的启示[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1560-1565.
- [8] 宋慧玲,王智源,周思源. 大国竞争背景下伴生能源金属可持续供给研究综述[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2024, 30(1): 99-111.
- [9] 徐德义,王迪,李军辉,等. 新发展格局下战略性矿产资源产业链供应链安全内涵及指标体系研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2023, 57(1): 1-12.
- [10] 刘刚,刘立涛,欧阳铨,等. 绿色低碳转型背景下关键金属循环利用战略与对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1566-1576.
- [11] Council of the European Union. Infographic - An EU critical raw materials act for the future of EU supply chains[EB/OL]. (2024-03-18) [2024-03-21]. <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/critical-raw-materials/>.
- [12] HE P W, FENG H B, HU G J, et al. Life cycle cost analysis for recycling high-tech minerals from waste mobile phones in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 251: 119498.
- [13] 中国循环经济协会. 废旧手机,“吃土”可惜[EB/OL]. (2024-03-13) [2024-03-22]. <https://chinacace.org/news/fieldsview?id=15416>.
- [14] SHITTU O S, WILLIAMS I D, SHAW P J. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges[J]. Waste Management, 2021, 120: 549-563.
- [15] HE P W, WANG C, ZUO L S. The present and future availability of high-tech minerals in waste mobile phones: Evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 192: 940-949.
- [16] 何朋蔚,王昶,左绿水,等. 基于废弃手机的高技术矿产可供性研究[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 589-599.
- [17] CORDELLA M, ALFIERI F, SANFELIX J. Reducing the carbon footprint of ICT products through material efficiency strategies: A life cycle analysis of smartphones[J]. Journal of Industrial Ecology, 2021, 25(2): 448-464.
- [18] WICHE P, PEQUEÑO F, GRANATO D. Life cycle analysis of a refurbished smartphone in Chile[C]// 10th International Conference on Life Cycle Management. France: EDP Sciences, 2022, 01011 (7 pp.).
- [19] YAO L M, LIU T T, CHEN X D, et al. An integrated method of life-cycle assessment and system dynamics for waste mobile phone management and recycling in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187: 852-862.
- [20] LI A, LI B, LU B, et al. Generation estimation and material flow analysis of retired mobile phones in China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(50): 75626-75635.
- [21] OZSUT BOGAR Z, GUNGOR A. Forecasting waste mobile phone (WMP) quantity and evaluating the potential contribution to the circular economy: A case study of Turkey[J]. Sustainability, 2023, 15(4): 3104.
- [22] BRUNO M, SOTERA L, FIORE S. Analysis of the influence of mobile phones' material composition on the economic

- profitability of their manual dismantling[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 309: 114677.
- [23] GÓMEZ M, GRIMES S, QIAN Y T, et al. Critical and strategic metals in mobile phones: A detailed characterisation of multigenerational waste mobile phones and the economic drivers for recovery of metal value[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138099.
- [24] ŠEBO J, FEDORČÁKOVÁ, M. Economic optimization of recycling oriented disassembly of consumer electronics: The case study of mobile phone[J]. *Journal of Production Engineering*, 2013, 16(2): 81–85.
- [25] ZHILYAEV D, CIMPAN C, CAO Z, et al. The living, the dead, and the obsolete: A characterization of lifetime and stock of ICT products in Denmark[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105117.
- [26] 倪明, 唐李钰, 杨善林. “双碳”目标下多因素驱动废旧智能手机回收路径研究[J]. *软科学*, 2024, 38(7): 95–106.
- [27] GHANADPOUR S H, POURABBASI M. Effective end-of-life (EOL) products management in mobile phone industry with using Twitter data analysis perspective[J]. *Environment Development and Sustainability*, 2023, 25(10): 11337–11366.
- [28] CHEN Y L, LIU Z B, KARIMIAN H, et al. Mapping the social stock and spatiotemporal distribution of high-tech minerals from wasted mobile phones in China: 2001—2019[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(12): 34306–34318.
- [29] HE P W, HU G J, WANG C, et al. Analyzing present and future availability of critical high-tech minerals in waste cellphones: A case study of India[J]. *Waste Management*, 2021, 119: 275–284.
- [30] INGHELS D, BAHLMANN M D. Hibernation of mobile phones in the Netherlands: The role of brands, perceived value, and incentive structures[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105178.
- [31] SAHAN M, KUCUKER M A, DEMIREL B, et al. Determination of metal content of waste mobile phones and estimation of their recovery potential in Turkey[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(5): 887.
- [32] KASTANAKI E, GIANNIS A. Forecasting quantities of critical raw materials in obsolete feature and smart phones in Greece: A path to circular economy[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 307: 114566.
- [33] GUO X Y, YAN K. Estimation of obsolete cellular phones generation: A case study of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 321–329.
- [34] HIRA M, YADAV S, MORTHEKAI P, et al. Mobile phones-an asset or a liability: A study based on characterization and assessment of metals in waste mobile phone components using leaching tests[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 342: 29–40.
- [35] REBITZER G, EKVALL T, FRISCHKNECHT R, et al. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications[J]. *Environment International*, 2004, 30(5): 701–720.
- [36] TAN Q Y, DONG Q Y, LIU L L, et al. Potential recycling availability and capacity assessment on typical metals in waste mobile phones: A current research study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 148: 509–517.
- [37] SINGH N, DUAN H, YIN F, et al. Characterizing the materials composition and recovery potential from waste mobile phones: A comparative evaluation of cellular and smartphones[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(10): 13016–13024.
- [38] LI J H, DONG Q, LIU L L, et al. Measuring treatment costs of typical waste electrical and electronic equipment: A pre-research for Chinese policy making[J]. *Waste Management*, 2016, 57: 36–45.
- [39] 何朋蔚, 彭亚山. 城市矿产开发利用: 前景、影响因素及管理政策[J]. *中国矿业*, 2023, 32(10): 1–10.
- [40] Zackbug. 一年废弃 4 亿部手机都去哪了, 我们跟拍 5 个月还原了全过程[EB/OL]. (2019-03-07) [2024-12-07]. <https://www.tmtpost.com/3803094.html>.
- [41] ZENG X, MATHEWS J A, LI J. Urban mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(8): 4835–4841.
- [42] CUCCHIELLA F, D'ADAMO I, LENNY KOH S C, et al. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51: 263–272.
- [43] 上海金属网. 上海金属网现货报价[EB/OL]. (2024-04-08) [2024-04-08]. <https://www.shmet.com/newData/newData.html#rareMetal>.
- [44] SHIH H S, SHYUR H J, LEE E S. An extension of TOPSIS for group decision making[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2007, 45(7/8): 801–813.

- [45] YAAKOB A M, GEGOV A. Fuzzy rule based approach with Z-Numbers for Selection of Alternatives using TOPSIS[C]// IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). New York: IEEE, 2015.
- [46] GOGUS O M. Fuzzy multi-criteria decision-making[D]. New Jersey: Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies, 1997.
- [47] GARCÍA-CASCALES M S, LAMATA M T. On rank reversal and TOPSIS method[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2012, 56(5/6): 123–132.
- [48] MELIN P, CASTILLO O, RAMÍREZ E G. Analysis and design of intelligent systems using soft computing techniques[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.
- [49] YELLISHETTY M, MUDD G M, RANJITH P G, et al. Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: Sustainability issues, problems and prospects[J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(6): 650–663.
- [50] International Aluminium Institute. Aluminium recycling factsheet[EB/OL]. (2020–10–01) [2024–03–27]. <https://international-aluminium.org/resource/aluminium-recycling-fact-sheet/>.
- [51] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 《关于加快废旧物资循环利用体系建设的指导意见》政策解读|加快建设废旧物资循环利用体系 助力实现碳达峰碳中和目标[EB/OL]. (2022–01–25) [2025–03–23]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202201/t20220125_1313163.html.
- [52] YOO E, LEE U, KELLY J C, et al. Life-cycle analysis of battery metal recycling with lithium recovery from a spent lithium-ion battery[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 196: 107040.
- [53] ZOE G, GEMMA T, MICHAEL O W, et al. Waste management: priority actions towards a nature-positive future[R]. New York: World Economic Forum, 2023.
- [54] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2023[R]. Paris: IEA, 2023.

On environmental impact and cost analysis of critical metal recycling in China from the perspective of a whole life cycle: Taking waste mobile phones as an example

HE Pengwei¹, PENG Yashan¹, PAN Yonghuai¹, FENG Haibo²

(1. School of Business, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China;
2. Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver V6T 1Z4, Canada)

Abstract: With the rise of intensifying international competition, securing the supply chain of critical metals has emerged as an important national strategic issue. The recycling of critical metals from waste mobile phones not only effectively alleviates environmental pressure but also serves as an essential approach to ensuring resource security. By employing Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC) methodologies, this study quantitatively analyzes and compares the environmental impacts and economic costs associated with recycling critical metals from waste mobile phones in China, based on relevant domestic and international literature, industry reports, and database resources. The study establishes a full life-cycle analytical framework spanning collection, material extraction, and final disposal of waste mobile phones, integrating a fuzzy model to mitigate data uncertainties. The findings indicate that the recycling of critical metals from discarded smartphones imposes a greater environmental impact compared to feature phones, and that meanwhile, replacing primary critical metals with those recovered from waste phones yields significant environmental benefits. Although the recycling costs of discarded smartphones exceed those of feature phones, the recovery value of critical metals in smartphones is considerably higher. Therefore, promoting the recycling of discarded mobile phones and enhancing the recovery rate of critical metals, particularly from smartphones, can deliver substantial environmental and economic benefits.

Key words: life cycle; waste mobile phones; critical metals; recycling; supply chain security

[编辑: 陈一奔]