

基于 LCA 的废弃手机资源化有效运输范围量化研究

李嘉文^{1,2}, 宋小龙^{1,3*}, 赵迪^{1,2} (1.上海第二工业大学电子废弃物研究中心, 上海 201209; 2.上海第二工业大学工学部, 上海 201209; 3.上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海 201209)

摘要: 基于生命周期评价方法(LCA)分析了废弃手机资源化过程的环境效益和跨区域运输过程的环境影响,并在此基础上提出了废弃手机跨区域流动的有效运输范围及其量化方法.通过采用 IMPACT 2002+评价模型,从人体健康、生态系统质量、气候变化、资源消耗四方面对当前中国废弃手机两种典型资源化利用方案和运输过程的环境表现进行了评估.结果表明,两种资源化方案均表现出显著环境效益;部件再使用和材料再生过程是废弃手机资源化环境效益的主要贡献来源;综合考虑跨区域运输过程,在满足环境效益为正的前提下,包括部件再使用和不包括部件再使用两种资源化方案的有效运输范围分别为 0~3094km 与 0~1248km.同时,对跨区域运输过程关键参数分析后发现,提高铁路运输占比和降低货车运输空返率可以有效扩大废弃手机跨区域转移的运输范围.

关键词: 生命周期评价; 废弃手机; 有效运输范围; 环境影响; IMPACT 2002+

中图分类号: X32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)02-0698-08

Quantitative analysis of the effective transport range of waste mobile phone recycling based on LCA. LI Jia-wen^{1,2}, SONG Xiao-long^{1,3*}, ZHAO Di^{1,2} (1.WEEE Research Center of Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2.College of Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 3.Shanghai Collaborative Innovation Center for WEEE Recycling, Shanghai 201209, China). *China Environmental Science*, 2019,39(2): 698~705

Abstract: A life cycle method was carried out to assess the environmental impacts of waste mobilephones in both recycling process and cross-regional transport process. Based on which, this paper defined the effective transport range and quantization method of the cross-regional transport process. The environmental performance of recycling process and transport process, were analyzed by using the IMPACT2002+ approach. The paper divided the recycling process into two scenarios according to the difference of the reuse process. The results showed that the two typical recycling processes were all shown as environmental benefits; the recycled materials and reused parts were the main sources of the environment benefits; and the effective transport range of two processes were 0~3094km and 0~1248km. Meanwhile, an analysis of the key parameters was also conducted to assess the influence of transport tools and the empty return rate of cross-regional transport processes. It was found that increasing the proportion of railway transport and reducing the empty return rate of truck transport can effectively expand the transport range.

Key words: life cycle assessment; waste mobilephone; effective transport range; environmental impact; IMPACT 2002+

中国作为电器电子产品生产和消费大国,预计 2020 年将产生 15.5 亿 t 电子废弃物^[1-2].手机因其体积小、使用频率高、更新换代快等不同于其他电子产品的特点,已经成为我国报废数量最多的一类电子产品^[3-5].据估算,2013 年我国手机报废量达到 7.99 亿部^[6],到 2025 年将增长至 9.37 亿部^[7].废弃手机在蕴含大量高资源化价值再生材料的同时,也具有潜在环境影响^[8-11].当前,我国废弃手机回收处理处于正规与非正规部门并存的发展初期^[12].废弃手机在市场与经济利益驱动下经多级回收和转运^[13-15],最终大部分流向位于我国东南沿海和中部省份的手机拆解处理商,或被翻新回用.由于废弃手机尚未纳入废弃电器电子产品处理基金的补贴范围,目前正规拆解处理企业较少开展废弃手机的拆解处理.总

体来看,无论是市场自发形成的多级转运现状,还是依据电子废弃物管理遵循的“多渠道回收和集中处理”要求,我国废弃手机的回收处理过程都存在与传统“四机一脑”等不同的跨区域流动特征.

应用生命周期评价方法(LCA)辨识、分析、评估电子废弃物的回收模式及拆解处理工艺正逐渐成为研究的热点^[16-18].除了用于评估电子废弃物资源化活动的生命周期环境效益^[19-21],LCA 也可分析各生命周期阶段的环境影响转移情况^[22].不少学者使用 LCA 方法对废弃手机开展相关研究,涉及回收

收稿日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41501598);上海第二工业大学研究生项目基金(EGD17YJ0008);上海市高原学科—环境科学与工程(资源循环科学与工程)

* 责任作者, 副研究员, songxiaolong@sspu.edu.cn

阶段、拆解阶段、资源化利用阶段^[23-24]。对于运输环节,有研究利用 LCA 方法对电子废弃物回收运输环节进行方案比较,设计回收物流网络^[16,25],或进行运输路径优化^[26]。也有学者针对如何确定废物运输距离进行研究^[27],但主要集中在工业固体废物方面^[28-30]。

废弃手机从回收阶段到拆解处理阶段之间的一个重要环节是其从回收点到拆解企业之间的流动过程,由此过程带来的跨区域运输的环境影响是制约废弃手机资源化利用可行性和有效性的重要因素^[27]。当前,我国废弃手机的跨区域流动路径尚不清晰,废弃手机在多元化回收方式和典型拆解处理方案下的环境效益与跨区域运输所致环境影响间的转化关系以及在两者约束下所确定的有效运输范围仍有待研究。本研究采用生命周期工具分别建

立考虑部件再使用和不考虑部件再使用两种方案下废弃手机资源化利用的生命周期模型,以生命周期综合环境表现为基准,提出有效运输范围概念及其量化方法,分析废弃手机资源化过程的环境效益并确定其跨区域运输的合理范围,有助于识别集中处理模式下跨区域流动对废弃手机资源化活动环境效益的影响,进而支撑拆解处理企业空间布局优化和电子废弃物管理系统的进一步完善。

1 研究方法 with 数据获取

1.1 生命周期环境影响评价方法

采用生命周期工具——GaBi 6.0 作为建模和分析软件,并选用 IMPACT 2002+模型量化废弃手机资源化利用方案及跨区域运输过程的环境表现。

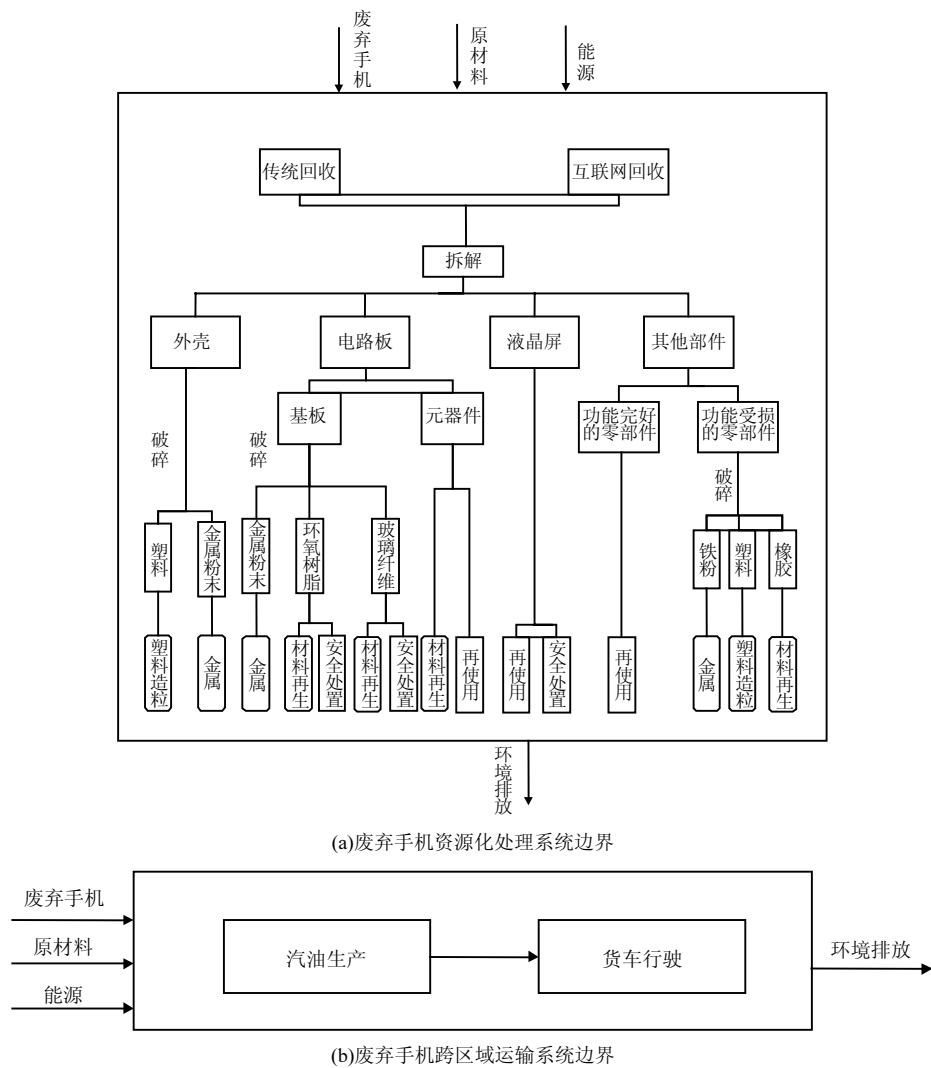


图 1 废弃手机回收处理系统边界
Fig.1 System boundary of waste mobile phone recycling

IMPACT 2002+是一种将中点环境影响类型和损害类型结合的评价方法.它将所有类型的生命周期清单结果通过 15 个环境影响类型(即中点, midpoint)分配给一个或多个环境损害类型(damage),来表示生命周期过程对环境的影响^[31-32].其中,前者基于等效原则,即中值特征评分以相对于基准物质的物质当量表示^[33],包括水体酸化、水体生态毒性、水体富营养化、致癌性、非致癌性、矿物开采、温室效应、电离辐射、土地占用、非再生能源消耗、臭氧层消耗、光化学氧化、呼吸系统影响、陆地酸化、陆地生态毒性;后者代表环境的质量变化,包括人体健康、生态系统质量、气候变化和资源消耗等 4 种主要类别^[34].该方法能够详细分析各环境影响类别,并针对终点类型完成环境影响评估^[35].

1.1.1 功能单位 本研究中的废弃手机指手机主体.由于回收到的废弃手机一般不包含各种配件,故研究对象不包括锂电池、充电器、数据线、耳机等配件.在生命周期模型建立过程中功能单位界定为 1000 部废弃手机.

1.1.2 系统边界 系统边界覆盖废弃手机从回收资源化到最终处理的全过程,具体包括废弃手机传统回收、互联网回收、跨区域运输、拆解、外壳破碎、线路板元器件脱除、线路板基板破碎分选、塑料造粒、金属材料再生、非金属材料再生与处置、元器件再使用与处置、液晶屏幕再使用与处置等过程,按生命周期阶段可划分为回收(含区域内运输)、跨区域运输、拆解、再使用、再生、最终处置 6 个环节.研究中为了进一步探究跨区域运输过程对废弃手机不同资源化过程的环境效益影响,将研究系统分为三个产品系统进行生命周期影响评价.第一个产品系统即废弃手机资源化方案 1,考虑部件再使用,包括回收、拆解、再使用、再生、处置等生命周期阶段;第二个产品系统即废弃手机资源化方案 2,不考虑部件再使用,包括回收、拆解、再生、处置等生命周期阶段.第三个产品系统为废弃手机跨区域运输过程.废弃手机回收处理生命周期系统边界见图 1.

在废弃手机资源化过程中,回收渠道包括传统回收方式和新型互联网回收方式;拆解主要指有资质的拆解处理企业利用人工拆解将废弃手机拆解

为外壳、电路板、液晶屏和其他部件等;电路板在进一步处理之前,其上的电子元器件被移除;通过典型企业调研得知废弃手机中再使用部件主要包括液晶屏、电路板元器件以及其他零部件,经检验合格后直接进入再使用阶段;材料再生过程包括金属冶炼过程、塑料造粒再生过程和无机非金属材料的再生过程等;安全处置过程包括对残渣的焚烧和安全填埋;至于跨区域运输过程,目前废手机跨区域运输主要采用的交通工具为货车,研究中设定为载重 2t 的汽油驱动货车.

1.2 有效运输范围量化方法

基于生命周期思想,一项需要额外运输过程的废弃物处理处置活动,其环境收益(environmental gain)必须大于其所增加的运输距离带来的环境损失(environmental loss),在环境表现上才是有效的^[30].基于此,本文提出废弃手机资源化有效运输范围是指在一定距离范围内废弃手机跨区域运输的环境影响小于或等于其资源化过程的环境效益.在这一空间范围内,废弃手机资源化在环境表现上是可行的,称之为有效运输范围.需要指出的是,这里所指的有效运输范围是废弃手机为实现资源化而增加的跨区域运输距离,不包括发生在回收环节和拆解处理过程中的城市内和厂区内的运输距离.

根据以上界定,废弃手机资源化过程环境表现上有效必须满足:

$$EI_T \leq EB_R \quad (1)$$

$$\text{即, } EI_T \cdot D \leq EB_T - EI_T \quad (2)$$

由(1),(2)可知,

$$D \leq (EB_T - EI_T) / EI_T \quad (3)$$

式中: EI_T 为跨区域运输过程的环境影响; EB_R 为废弃手机资源化过程的整体环境效益; EI_T 为废弃手机单位运输距离的环境影响; D 为跨区域运输距离; EB_T 为材料再生、部件再使用过程产生的环境效益; EI_T 为回收处理过程产生的环境影响.

1.3 关键参数及数据来源

本研究中的废弃手机均指退出使用阶段的废弃手机,不包括经过翻新和维修后再次进入使用阶段的二手手机、翻新手机.研究中对市场上废弃手机类型进行调研后分为大屏机、翻盖机、小屏机,并对其重量和部件组成等数据信息进行分类汇总,最终按照 3 种手机类型的市场占比、平均重量和拆解部

件占比等数据,加权平均得到废弃手机的综合模型。其中,各拆解部件重量和关键材料组成见表 1。

表 1 废弃手机拆解部件及材料组成
Table 1 Disassembly parts and material composition of waste mobile phone

拆解部件	重量(g)	关键组分
外壳	35.70	工程塑料 17.85g;铝 16.95g;镁 0.90g
线路板基板	12.67	金 1.09mg;银 4.12mg;钯 0.52mg;铜 6.27g;环氧树脂 3.73g;玻璃纤维 2.67g
线路板元器件	8.07	金 4.34mg;银 16.47mg;钯 2.09mg;铁合金 8.07g
液晶屏	8.66	玻璃基板 7.79g;液晶 0.01g;钢 3.2mg
其他	21.51	橡胶 4.55g;塑料 5.05g;铁合金 6.04g

根据对典型城市废弃手机回收市场调研发现,我国废弃手机主要回收类型为传统回收(占比 80%)和互联网回收(占比 20%)。其中传统回收包括维修店回收(占比 16%)、走街串巷回收(占比 64%);互联网回收包括线上邮寄回收(占比 8%)、线下门店回收(占比 8%)和上门回收(占比 4%)。

废弃手机拆解、破碎分选、安全处置等过程数据来自典型拆解企业的拆解工艺数据;对于部件的再使用过程,依据市场需求只考虑大屏机部件再使用,包括液晶屏、电路板元器件和其他零部件(如摄像头、振子、听筒、话筒、扬声器等);材料再生过程包括金属再生、塑料造粒、环氧树脂再生、玻璃

纤维再生、橡胶再生等再生过程;在开展生命周期评价研究时,不考虑设备、场地、机器等折旧与维护情况。

研究中优先采用市场调研与企业实际生产过程作为一手数据来源,缺失的数据则采用拆解实验数据进行补充。对于背景过程以及难以获得一手数据的单元过程,如,能源生产过程、再使用部件产品的生产替代过程、塑料造粒过程、金属再生过程、非金属材料再生过程、运输过程,本研究选用 PE-database 和 ecoinvent3 等成熟的商业数据库数据并与相关文献数据进行交叉验证,确保了数据的代表性。生命周期清单数据来源及参数取值详见表 2。

表 2 生命周期清单数据参数取值及来源
Table 2 The data sources and values of key processes

关键过程	数据来源	代表性	参数取值
回收	市场调查、典型企业	区域水平	传统回收 80%、互联网回收 20%
运输	文献 ^[36-37] 、PE-database	中国	货车载重 2t
拆解	典型企业、ecoinvent3	行业水平	—
部件再使用	典型企业、ecoinvent3	全球	液晶屏再使用率 14.7% 元器件/部件再使用率 34.3%
材料再生	典型企业、ecoinvent3	全球	金属再生率 95% 环氧树脂再生率 70% 玻璃纤维再生率 70% 塑料再生率 95%
安全处置	PE-database	全球	—

2 结果与讨论

2.1 生命周期环境影响评价结果

针对废弃手机资源化方案 1、方案 2、跨区域运输过程建立生命周期模型,使用生命周期评价方法 IMPACT 2002+对模型数据进行量化,得到 15 个中点环境影响类型(midpoint)评价结果(表 3)。

结果表明,两种方案的 15 个中点环境影响类型

结果均为负值,说明资源化过程环境表现显示为环境效益。废弃手机跨区域运输环节中环境影响主要来源是汽油的生产过程以及行驶过程中的尾气排放,在水体生态毒性、非再生能源消耗、呼吸系统影响、温室效应等影响类型方面表现出突出环境影响。

进一步选取典型中点环境影响类型进行分析:(1)温室效应:温室效应的主要影响因素是向大气中排放二氧化碳和甲烷等温室气体,在方案 1 和方

案 2 中表现为避免了温室气体的排放.其中,资源化过程中线路板元器件再使用贡献占比 28.56%、液晶屏再使用贡献占比 31.53%、元器件再生过程占比 42.29%、线路板材料再生过程占比 11.6%.元器件再生过程贡献占比最高,为温室效应环境效益的最大贡献来源.跨区域运输过程中主要温室气体排放来源于货车行驶.其中汽油生产过程和使用过程对温室效应的贡献分别为 14.53%和 85.47%.(2)矿物开采:矿物开采主要影响因素是产品生命周期中可供人

类利用的天然矿物资源的开采情况,在废弃手机资源化过程中电力消耗和汽油消耗均会对产生该环境影响,而部件再使用和材料再生则会避免矿物开采.分析表明,线路板元器件再使用贡献占比 22.81%、液晶屏再使用贡献占比 36.49%、元器件再生过程占比 23.54%、线路板材料再生过程占比 15.40%.液晶屏再使用过程为主要贡献来源.跨区域运输过程在矿物开采的环境影响主要来自汽油生产过程.

表 3 IMPACT 2002+中点环境影响类型评价结果
Table 3 Midpoint result of IMPACT 2002+

中点环境影响类型	单位	资源化方案 1	资源化方案 2	跨区域运输
水体酸化	kg SO ₂ eq	-6.26×10 ¹	-2.85×10 ¹	1.18×10 ⁻³
水体生态毒性	kg TEG water	-3.58×10 ⁸	-1.45×10 ⁸	3.26×10 ¹
水体富营养化	kgPO ₄ eq water	-1.44×10 ²	-6.15×10 ¹	1.32×10 ⁻⁵
致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	-2.36×10 ³	-9.99×10 ²	6.99×10 ⁻⁴
温室效应	kg CO ₂ eq	-1.18×10 ⁴	-5.00×10 ³	1.55×10 ⁰
电离辐射	Bq C-14eq	-1.30×10 ⁵	-5.07×10 ⁴	1.26×10 ⁻¹
土地占用	m ² _{eq} org.arable	-1.39×10 ¹	-4.47×10 ⁰	4.99×10 ⁻²
矿物开采	MJ surplus	-2.74×10 ³	-1.32×10 ³	1.59×10 ⁻⁴
非致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl _{eq}	-1.18×10 ³	-4.03×10 ²	2.74×10 ⁻³
非再生能源消耗	MJ primary	-1.50×10 ⁵	-6.22×10 ⁴	2.74×10 ¹
臭氧层消耗	kg CFC-11eq	-6.35×10 ⁻⁴	-2.14×10 ⁻⁴	1.59×10 ⁻¹²
光化学氧化	kg C ₂ H ₄ eq	-4.70×10 ⁰	-1.25×10 ⁰	2.09×10 ⁻²
呼吸系统影响	kg PM2.5eq	-2.75×10 ¹	-1.08×10 ¹	2.61×10 ⁰
陆地酸化	kg SO ₂ eq	-3.26×10 ²	-1.52×10 ²	7.13×10 ⁻²
陆地生态毒性	kg TEG soil	-5.52×10 ⁵	-2.12×10 ⁵	7.06×10 ⁻¹

注: eq为当量,TEG为triethylene glycol.

2.2 有效运输范围量化结果

为得到在两种资源化方案下的有效运输范围,在中点环境影响类型结果的基础上,采用环境损害类型评价分值表征方案 1 和方案 2 的环境影响(图 2).

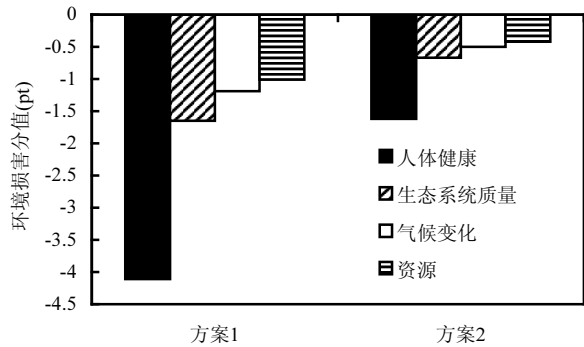


图 2 废弃手机资源化方案环境损害评价结果

Fig.2 The environmental damage results of waste mobile phone recycling

由图 2 可以看出,两种资源化方案的环境表现均为环境效益,且方案 1 中 4 种环境损害类型的评价分值均分别低于方案 2,原因是两方案中涉及到的部件再使用和材料再生过程对人体健康、生态系统质量、气候变化、资源消耗贡献较大,可以抵消回收过程以及拆解处理过程中能源消耗和环境排放物所带来的环境影响,且方案 1 在考虑材料再生的基础上考虑了部件再使用过程.对 4 种环境损害类型进行分析,人体健康分值在两方案中均为最低,分别为 -4.11、-1.62;资源消耗分值在两方案中均为最高,分别为 -1.01、-0.42;两方案中 4 种环境损害类型分值的大小规律保持一致.对 4 种环境损害类型的环境影响进行归一化处理,可得方案 1 和方案 2 的环境损害分值分别为 -7.96 和 -3.21.按废弃手机资源化过程不同生命周期阶段进行分析,两方案中回收阶段、拆解阶段、安全处置阶段环境影响贡献较小,部件再使

用阶段与材料再生阶段贡献较大.其中,方案 1 部件再使用阶段与材料再生阶段分别占比 63.50%和 40.65%;方案 2 材料再生过程占比高达 112.60%.此外,跨区域运输过程表现为环境损耗,环境损害分值为 2.57×10^{-3} ,其中人体健康、生态系统质量、气候变化和资源消耗分值依次为 2.57×10^{-3} 、 1.01×10^{-7} 、 1.58×10^{-6} 和 1.84×10^{-6} .

基于废弃手机资源化方案和跨区域运输过程的环境损害分值,分别转化为环境效益和环境影响值后,代入式(3),最终计算出在环境表现可行的条件下方案 1 的最大有效运输范围为 0~3094km,方案 2 的最大有效运输范围为 0~1248km.也就是说,从环境表现上来看,如果考虑零部件再使用情况,则废弃手机资源化在 0~3094km 的跨区域运输范围内是可行的;如果不考虑废弃手机零部件的再使用,则在 0~1248km 的跨区域运输范围内是可行的.若以中国地理版图的几何中心(兰州)为废弃手机的回收点,模拟跨区域转移过程,则两种资源化方案下的有效运输范围如图 3 所示.结果显示,考虑废弃手机零部件再使用的资源化方案可以实现其在全国范围内进行跨区域公路运输,不考虑零部件再使用则有效运输范围将会明显缩小,其环境效益仅能承载废弃手机在中部省份进行跨区域转移.

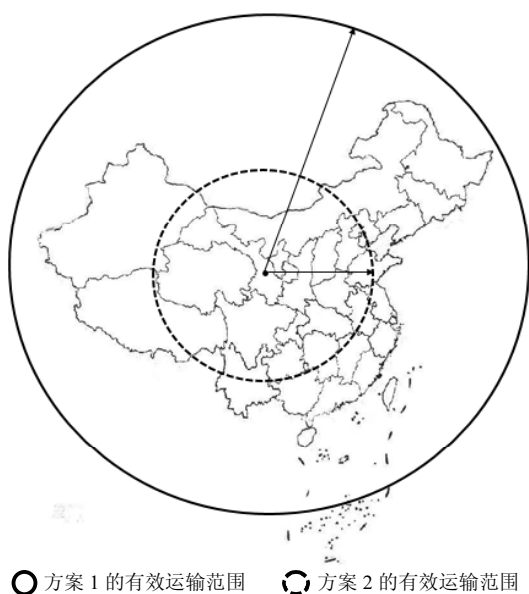


图 3 废弃手机资源化方案下的有效运输范围

Fig.3 Transport range of waste mobile phone recycling processes

2.3 跨区域运输过程关键参数分析

为深入研究关键因素对废弃手机跨区域运输有效范围的影响,结合前文的参数设定与关键假设,分别选取运输方式和货车空返率两个参数进行讨论分析.

针对废弃手机跨区域转运过程中可能采取的不同运输方式,设定铁路运输占比从 0 增长至 50%(即相应的货车运输占比从 100%降至 50%)分析有效运输范围的变化情况.结果显示,随着铁路运输的占比增加有效运输范围呈上升趋势,方案 1 与方案 2 中的有效运输范围分别由 0~3094km 和 0~1248km 增长至 0~6189km 与 0~2496km(图 4).由此可见,在环境表现可行的条件下,增加铁路运输方式占比可以提高我国废弃手机跨区域转移的有效运输范围.

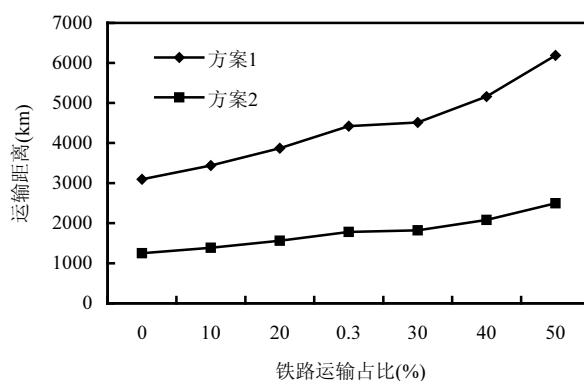


图 4 铁路运输占比对有效运输范围的影响

Fig.4 The effect of railway transport rate on effective transport range

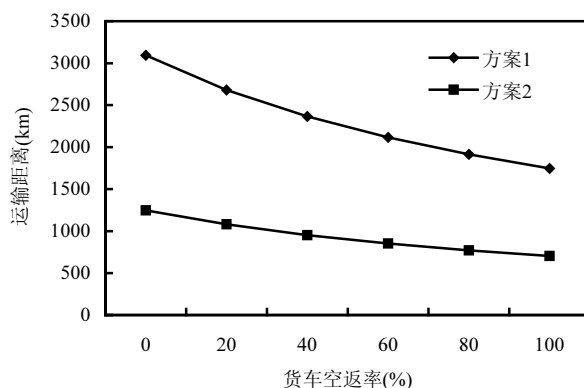


图 5 公路运输货车空返率对有效运输范围的影响

Fig.5 The effect of empty return rate on effective transport range

考虑到目前我国废弃手机跨区域运输可能存

在较高的空返率,因此有必要分析货车在跨区域运输中的空返情况.设定货车空返率从0增加至100%,考察废弃手机跨区域流动有效运输范围的变化趋势.结果表明,货车空返率的提高将导致有效运输范围的显著减少,由此引起方案1与方案2中的有效运输范围分别由0~3094km和0~1248km减少至0~1747km与0~704km(图5).因此,在我国现有运输条件基础上降低货车跨区域运输空返率,可以扩大废弃手机资源化过程跨区域转移的有效运输范围.

3 结论

3.1 采用生命周期环境影响评价方法 IMPACT 2002+,针对两种废弃手机资源化利用方案和跨区域运输过程分别建立生命周期模型.环境影响类型分析结果表明,废弃手机资源化过程表现为环境效益,且线路板元器件再使用、液晶屏再使用、元器件材料再生为各项中点环境影响类型的主要贡献来源.

3.2 对方案1、方案2、跨区域运输过程四种环境损害类型结果进行分析表明,方案1、方案2、跨区域运输过程的环境损害分值分别为-7.96、-3.21、 2.57×10^{-3} ;方案1中废弃手机部件再使用和材料再生过程是资源化环境效益的主要贡献来源,分别占比63.50%和40.65%;方案2中材料再生过程是资源化环境效益的主要贡献来源,占比高达112.60%;至于跨区域运输过程,汽油生产是造成其环境影响的主要因素.

3.3 在跨区域运输环境影响不大于资源化过程环境效益的前提下,计算得到资源化方案1、方案2对应的有效运输范围分别为0~3094km与0~1248km.在环境表现可行条件下考虑废弃手机的零部件再使用可以扩大其有效运输距离,从而支持废弃手机回收处理企业在更大的空间范围内进行布局.对废弃手机跨区域运输过程的运输方式和空返率两个关键参数进行分析表明,提高铁路运输占比以及降低货车运输的空返率可以有效提高废弃手机跨区域转移的有效运输范围.

参考文献:

[1] Zeng X L, Duan H B, Li J H. Examining environmental management of e-waste: China's experience and lessons [J]. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, 2017,72:1076-1082.

[2] Duan H B, Hu J K, Tan Q Y, et al. Systematic characterization of generation and management of e-waste in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016,23(2):1929-1943.

[3] Xu C J, Zhang W X, He W Z, et al. The situation of waste mobile phone management in developed countries and development status in China [J]. *Waste Management*, 2016,58:341-347.

[4] Sarath P, Bonda S, Mohanty S, et al. Mobile phone waste management and recycling: Views and trends [J]. *Waste Management*, 2015,46:536-545.

[5] Wang R X, Xu Z M. Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): a review [J]. *Waste Management*, 2014,34(8):1455-1469.

[6] 李 博,杨建新,吕 彬,等.中国废旧手机产生量时空分布研究 [J]. *环境科学学报*, 2015,35(12):4095-4101.

Li B, Yang J X, Lü B, et al. Temporal and spatial variations of retired mobile phones in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2015, 35(12):4095-4101.

[7] 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.

[8] Singh N, Duan H B, Yin F F, et al. Characterizing the materials composition and recovery potential from waste mobile phones: A comparative evaluation of cellular and smart phones [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018,DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b02516.

[9] Chen Y, Chen M J, Li Y G, et al. Impact of technological innovation and regulation development on e-waste toxicity: A case study of waste mobile phones [J]. *Scientific Reports*, 2018,(8):7100 DOI:10.1038/s41598-018-25400-0.

[10] 丁江铃,张小平,朱亚茹,等.HCl-CuCl₂-NaClO 湿法浸取手机元器件中的钯、金 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(12):3711-3716.

Ding J L, Zhang X P, Zhu Y R, et al. Extraction of Pd, Au from phone components in HCl-CuCl₂-NaClO solutions [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(12):3711-3716.

[11] 杨 彦.电子废弃物拆解场多氯联苯含量及健康风险评估 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(4):727-735.

Yang Y. Concentration and health risk assessment of PCBs in E-waste dismantling field [J]. *China Environmental Science*, 2012,32(4):727-735.

[12] 于可利,邱金凤,张艳会.我国废旧手机回收行业现状、挑战及对策 [J]. *资源再生*, 2016,(9):42-45.

Yu K L, Qiu J F, Zhang Y H. The status, challenges and strategies of China's waste mobile phone recycling industry [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2016,(9):42-45.

[13] Gu Y F, Wu Y F, Xu M, et al. The stability and profitability of the informal WEEE collector in developing countries: A case study of China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016,107:18-26.

[14] 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.

[15] Yin J F, Gao Y N, Xu H. Survey and analysis of consumers' behaviour

- of waste mobile phone recycling in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014,65:517–525.
- [16] Tong X, Wang T, Chen Y G, et al. Towards an inclusive circular economy: Quantifying the spatial flows of e-waste through the informal sector in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,135:163–171.
- [17] 程桂石,李金惠,刘丽丽. 电子废物资源化循环转化过程与代谢规律研究 [J]. *中国环境科学*, 2010,30(5):658–665.
- Cheng G S, Li J H, Liu L L. Recycling process and metabolic rule of electronic waste [J]. *China Environmental Science*, 2010,30(5):658–665.
- [18] 谭全银,梁扬扬,董庆银,等. 废弃办公设备关键部件处理环境影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(7):2646–2655.
- Tan Q Y, Liang Y Y, Dong Q Y, et al. Study on the environmental impact of waste office equipment critical component treatment [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(7):2646–2655.
- [19] Menikpura S N M, Santo A, Hotta Y. Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014,74:183–190.
- [20] Johansson J G, Björklund A E. Reducing life cycle environmental impacts of waste electrical and electronic equipment recycling [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2010,14(2):258–269.
- [21] Song Q, Wang Z, Li J, et al. Life cycle assessment of TV sets in China: a case study of the impacts of CRT monitors [J]. *Waste Management*, 2012,32(10):1926–36.
- [22] Baxter J, Lyng K A, Askham C, et al. High-quality collection and disposal of WEEE: Environmental impacts and resultant issues [J]. *Waste Management*, 2016,57:17–26.
- [23] 宋小龙,李 博,吕 彬,等. 废弃手机回收处理系统生命周期能耗与碳足迹分析 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(6):2393–2400.
- Song X L, Li B, Lü B, et al. Life cycle energy use and carbon footprint of waste mobile phone treatment system [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(6):2393–2400.
- [24] Yu J L, Williams E, Ju M T. Analysis of material and energy consumption of mobile phones in China [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(8):4135–4141.
- [25] Barba-Gutiérrez Y, Adenso-Díaz B, Hopp M. An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52(3):481–495.
- [26] Gamberini R, Gebennini E, Manzini R, et al. On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network—A case study [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010,54(11):937–951.
- [27] 宋小龙. 工业固体废物生命周期管理过程解析与优化方法 [D]. 中国科学院大学, 2013.
- Song X L. Life cycle management of industrial solid waste: identification and optimization of processes [D]. Chinese Academy of Sciences University, 2013.
- [28] 姜 睿,王洪涛,张 浩,等. 中国水泥生产工艺的生命周期对比分析及建议 [J]. *环境科学学报*, 2010,(11):2361–2368.
- Jiang R, Wang H T, Zhang H, et al. Life cycle assessment of cement technologies in China and recommendations [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010,(11):2361–2368.
- [29] Gösswein V, Gonçalves A B, Silvestre J D, et al. Transportation matters – Does it? GIS-based comparative environmental assessment of concrete mixes with cement, fly ash, natural and recycled aggregates [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018,137:1–10.
- [30] Fullana i Palmer P, Puig R, Bala A, et al. From life cycle assessment to life cycle management: A case study on industrial waste management policy making [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011,15(3):458–475.
- [31] UNEP. Joliet O, Brant A, Coedkoop M, et al. LCIA Definition study of the SETAC-UNEP Life Cycle Initiative [EB/OL]. <http://www.uneptie.org/pc/sustain/lcinitiative>, 2003.
- [32] 葛振香. 基于 LCA 的山东省造纸业可持续发展研究 [D]. 山东: 山东师范大学, 2017.
- Ge Z X. Research on sustainable development of Shandong paper industry based on LCA [D]. Shandong: Shandong Normal University, 2017.
- [33] Joliet O, Margni M, Charles R, et al. IMPACT 2002+ A new life cycle impact assessment methodology [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003,10(6):325–330.
- [34] Joliet O, Müller-Wenk R, Bare J, et al. The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004,9(6):394–404.
- [35] Scharnhorst W, Althaus H J, Classen M, et al. The end of life treatment of second generation mobile phone networks: Strategies to reduce the environmental impact [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2005,25(5):540–566.
- [36] 马丽萍,王志宏,龚先政,等. 城市道路两种货车运输的生命周期清单分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Ma L P, Wang Z H, Gong X Z, et al. Life cycle inventory analysis of two types of freight transport on city roads [J]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [37] Spielmann M, Scholz R. Life Cycle Inventories of transport services: Background data for freight transport [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2005,10(1):85–94.

作者简介: 李嘉文(1993–),女,河北邯郸人,上海第二工业大学硕士研究生,主要从事电子废弃物资源化和生命周期评价(LCA)及其应用研究。