

基于EPR的手机逆向物流空间分析

黄慧婷 王涛 童昕[†]

北京大学城市与环境学院, 北京 100871; [†] 通信作者, E-mail: tongxin@urban.pku.edu.cn

摘要 以废弃手机为例, 通过实地访谈, 总结目前手机逆向物流的3种典型模式。以广东省为例, 采用保有量系数法, 估算全省2020年手机废弃量将达到1662万台, 再利用Gompertz模型预测全省废弃手机的空间分布。在此基础上, 采用市场区划分方法, 分别计算通过城市废物收集系统集中后再运往规范处理厂的环保化回收成本与通过消费者直接寄回的环保化回收成本, 发现前者成本高于后者, 考虑到以二手销售为主要目标的互联网回收模式的净收益, 后者的盈利水平明显更高。目前手机的全生命周期管理需要从产业发展和环境保护的双重目标出发, 有效地整合不同回收模式, 在鼓励二手再利用市场发展的同时, 设计合理的机制, 保证产品最终废弃后的环保化处理。基于生产者责任延伸制度, 品牌企业应发挥龙头作用, 将多种回收模式整合进企业的逆向供应链系统, 实现产品整个生命周期的有效管理。

关键词 生产者责任延伸制度; 逆向物流; 商业模式; 空间分析

中图分类号 F429.9

Spatial Analysis of Reverse Logistics for Waste Mobile Phone Based on Extended Producer Responsibility

HUANG Huiting, WANG Tao, TONG Xin[†]

College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;
[†] Corresponding author, E-mail: tongxin@urban.pku.edu.cn

Abstract This paper takes mobile phone as an example to analyze the innovation of WEEE takeback system in Guangdong. With interviews on various enterprises at different stage along the recycling chain, three models of waste mobile phone collection were identified. Spatial analysis was conducted on the cost of reverse logistics under each model for waste mobile phone collection in Guangdong. The results show that Guangdong will have 16.62 million wasted mobile phones in 2020. The cost of collection for environmental recycling by the municipal waste transportation system is much cheaper than the cost of collection directly by producers. While considering the net profit of internet collection for second-hand sales, the internet collection is more profitable. In conclusion, it is suggested that the producer could integrate the different collection system into their reverse logistic system under the principle of EPR, using the profits from second market sales through internet to cover the cost of environmental recycling.

Key words extended producer responsibility; reverse logistics; business model; spatial analysis

伴随着环境保护要求的提高和互联网营销模式的兴起, 将产品从消费端回收并送往合适的处置地点, 以利于循环利用及合理处置的需求正在快速增长, 并催生逆向物流研究^[1]。作为企业绿色供应链体系的重要环节, 逆向物流不仅需要提高物流组织

效率, 而且面临新制度下企业产品责任的再分配, 由此带来商业模式的重构^[2-3]。生产者责任延伸制度(extended producer responsibility, EPR)是促使企业参与逆向物流系统建设的重要推动力之一^[4]。中国于2009年在废弃电子产品领域率先引入 EPR 制

度^[5], 2012年在政府回收基金补贴的支持下, 基于省级理论报废量估算, 建立覆盖全国的一百多家标准化废弃电器电子产品处理工厂以及相应的线路板、阴极射线管等高环境敏感部件的专业处理厂, 初步形成电子废物标准化处理的产业体系^[6-7]。然而, 由于缺乏有效的商业模式支撑, 目前补贴废弃电器电子产品规范化处理的政府基金已面临入不敷出的窘境。在此背景下, 2016年工业与信息化部联合四部委组织开展电器电子产品生产者责任延伸试点工作, 致力于推动生产者主导建立市场化的逆向物流模式, 以期提升电子废物循环经济发展的可持续性。其中, 手机作为2015年新纳入基金管理目录的产品, 其回收模式的创新发展得到业界的普遍关注^[8-9]。本文以废旧手机为例, 基于对第一批参与试点的部分企业的实地调查, 探讨适应新商业模式的逆向物流空间布局策略。

1 EPR制度下的逆向物流商业模式

1.1 EPR制度背景

生产者责任延伸制度(EPR)指生产者对产品承担的责任延伸到产品废弃后的回收处理环节, 从而将废物处理成本内化到产品市场价格之中, 以激励生产者改进产品设计和商业模式, 实现废物减量和促进资源循环的目的^[10-11]。这一概念起源于20世纪80年代欧洲部分国家的地方废物管理实践, 随后在欧美城市废物管理制度中被广泛采纳, 成为产品环境责任划分的重要原则之一^[10-11]。目前关于EPR的含义存在两种解读, 欧盟认为P代表生产者(Producer), 强调生产者需对产品的回收处理和再利用负主导责任, 美国认为P代表产品(Product), 强调产品的各个生命周期阶段都需有人负责, 其中回收处理应由政府、消费者和生产者共同参与, 以保证产品的低环境污染和高效率利用。不管侧重点如何, 生产者在EPR制度下都需要对产品废弃后的回收处理承担更多的责任^[12]。

1.2 逆向物流商业模式

面对生产者责任延伸的法律要求, 生产者需要有效地参与逆向物流体系建设, 这对传统物流体系带来一定的挑战。逆向物流主要连接三大主体——消费者(Consumers)、生产者(Manufacturer)和循环处理者(Recycler)。其中, 消费者是产品回收流程的起点; 循环处理者主要对回收产品进行分类拆解和处理加工, 通过产品和材料的循环利用, 提高回收

物的再利用价值, 并保证整个过程符合环境保护的标准。在EPR制度下, 生产者的介入不仅在于提高后端循环处理的环保标准, 更在于通过这种介入激励整个产业链采纳生态设计, 改变消费模式, 促进废物减量。从EPR制度设计的初衷来看, 基于生产企业的个体责任是为前端生态设计和废物减量提供激励的根本。然而, 现代工业体系分工日趋复杂, 技术创新与新产品促销是企业市场竞争力的基础, 导致现实情况下企业无力顾及生产消费后的回收处理问题, 往往根据自身市场定位, 选择集体责任的形式, 也就是在缴纳一定数额的处理费用后, 由第三方机构来承担回收处理的具体行为责任。在给定处理费用的前提下, 逆向物流的经营主体主要负责从成本角度规划设计回收网络和相关设施的布局^[13]。

手机是现代个人消费的通信技术产品发展的代表, 由于产品更新换代快, 时尚消费日益超越产品的功能需求, 产品废弃时存在多种可行的循环利用方式, 再利用的市场价值和环境效益都远远高于材料循环, 成为降低产品生命周期环境影响的重要途径^[14]。近年来, 随着EPR理念逐步被产业界接纳, 将逆向物流与销售相结合, 成为提升供应链价值创造能力的一个潜在机遇, 由此激发逆向物流商业模式创新的热潮^[3]。逆向物流优化也从降低成本为主, 转向相关主体博弈及利益分享机制的探索^[15-17], 以期利用市场机制实现废物减量的环境与经济价值的双赢^[18-19]。在高度垂直分工的供应链协作模式下, 废旧手机回收市场自发形成多样化的逆向物流组织模式^[20-23], 生产企业也开始主动参与其中。针对废弃产品最终的环保化处理需要结合这种多样化的再利用市场。本文从逆向物流的空间分析入手, 考察在EPR框架下如何实现环保化回收与市场化再利用机制的有效结合。

2 废旧手机回收模式

广东省是我国电子信息产品的主要生产基地之一, 手机是其近年来产量增长最快的产品, 据《国家统计年鉴2016》, 2015年广东省的手机产量占全国的46.23%。广东省的电子废物循环利用产业链也非常发达, 形成产品修复、元器件再利用和材料循环的复杂产业链。但是, 这个产业链在相当长的时期处于环保和市场监管的灰色地带, 一边是珠三角深受诟病的“山寨经济”, 另一边是类似贵屿这样

深受污染的电子废物集中处理区。为了系统地解决这些问题,广东省在电子废物管理方面做了很多尝试,包括按照环保部的电子废物规范处理标准建立新的正规化电子废物处理厂,以及改造传统电子废物集中处理区。但是,环保化处理与复杂的再生利用产业链之间的衔接,始终是一个难题。本文在实地调研的基础上,针对传统回收、环保化回收和互联网回收3种基本模式,估算逆向物流系统的物流成本,以期为EPR制度建构提供参考。

2.1 传统回收模式

传统回收主要基于废旧产品市场价值的交易活动。从全球尺度来看,巨大的区域发展不平衡是电子废物跨国交易的主要驱动因素。高度集聚的全球工厂为再生元器件和原料提供巨大的需求,导致出现广东贵屿这样的电子垃圾产业集聚的区域。因此,传统回收链条上的各个环节都受市场利益驱动,分散的交易主体各自以自身利益最大化为目标。与前向的生产网络一样,传统回收体系同样以材料高效利用和灵活适应市场变化为特点,但在缺乏有效监管的情况下,处理过程的环境保护要求往往难以落实。

从逆向物流组织方式上来看,传统回收模式(图1)依赖走街串巷的零散回收商贩及二手电子市场来实现废弃电子产品的回收,通过层层筛选,可以翻新维修的进入二手电子产品市场。无法实现功能修复的,便集中销往电子废物拆解处理集散地,拆出可利用的零部件,用于维修和组装,或者用于玩具等产品中的电子配件。最后拆解的剩余物中可利用的材料,如塑料、废线路板也有专门的企业回收再利用。从激励机制上来看,传统回收模式以市场需求为驱动力,直接采用现金交易,形成较成熟和稳定的上下游产业链。但是,一些环境风险较大

的处理环节,如废线路板中的金属回收、废塑料再利用等,需要有效的外部监管。此外,传统拆解后流入市场的翻新机在知识产权、消费者隐私保护和产品质量等方面存在诸多问题,成为政府管控的主要原因。

2.2 环保化回收模式

随着对电子废物处理过程中环境问题认识的不断加深,加强环保监管已经成为广泛共识。研究显示,广东省电子废弃物处理的集中区,如清远和贵屿等地,电子废物处理导致当地空气、水体、土壤中的重金属和持久有机物污染不断积累^[24-26]。在这样的环境中,当地动植物体内毒素含量远高于其他地区^[27],80%以上儿童体内血铅含量、血铬含量超标^[28],职业暴露人群机体损伤程度严重^[29]。为了控制处理过程中的环境污染,环保化回收模式强调最终废弃的电子产品必须流向符合环境保护要求的正规化处理厂。为此,以环保管控为主要目标的环保化回收模式逐渐发展起来。这种模式强调整个回收链条上,从消费者到回收渠道都以环境保护为目标,自觉将废弃产品交到规范有资质的回收渠道。

从逆向物流组织方式上来看,环保化回收模式(图2)充分利用生产商和零售商的内部物流体系,同时第三方主体为回收同时提供便捷的逆向物流网络和可靠的回收平台,如常见的社区废弃电子产品回收箱、回收信封及现场回收活动等。政府在其中发挥着多方协调的作用,一方面加大环保宣传力度,促进民众环保意识的树立,另一方面对第三方平台、专业回收处理企业进行品牌宣传及政策补贴。

就激励机制而言,环保化回收模式依赖于消费者自发的环保行为,主要的激励来源于两方面。一是物质报酬激励,如活动派发的小礼品、话费、流

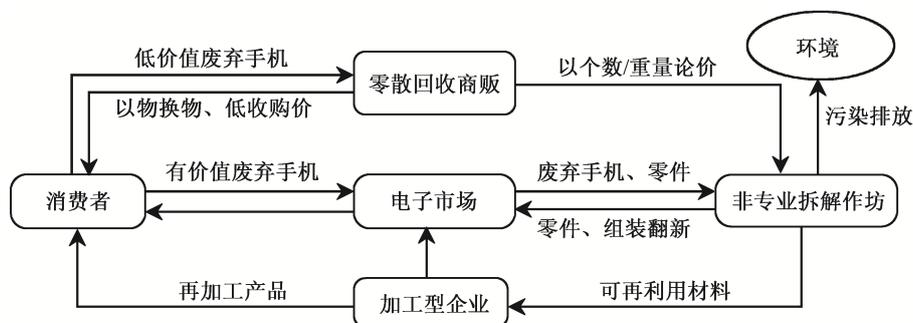


图1 传统回收模式流程

Fig. 1 Flow chart of traditional recycling model

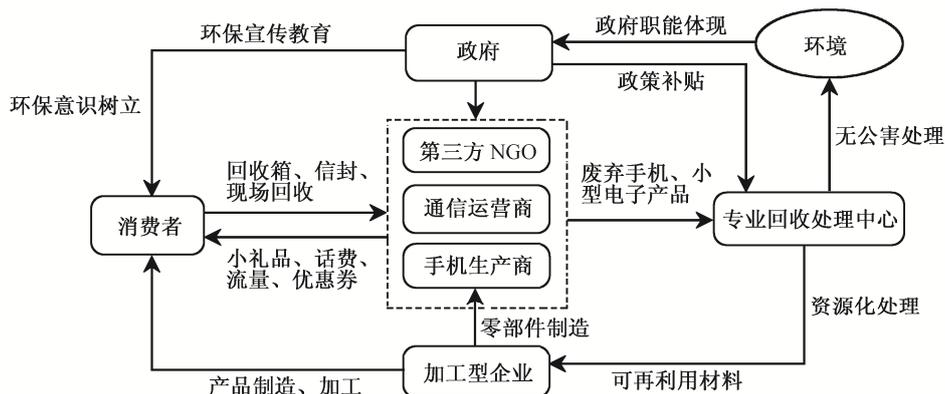


图 2 环保化回收模式流程
Fig. 2 Flow chart of environmental recycling model

量和优惠券，这类报酬价值较低、流通性较弱，激励效果有限；二是道德激励，政府及第三方主体通过活动宣传为消费者树立良好的环保意识，激励消费者自发地参与到回收过程中，在社会上营造出全民注重环保的氛围后，道德激励发挥的作用将十分显著，这正是日后公众引导的重要方向。

综合来看，环保化回收模式具有回收成本低、公益性等优势，但在发展过程中仍然存在一些难点。由于物质激励较弱，环保化回收发展前期易出现回收率低的问题，就目前推广情况来看，负责“四机一脑”环保化回收模式建设的政府基金已陷入入不敷出的困境，在手机环保化回收方面需要更有力的商业支撑和模式创新。

2.3 互联网回收模式

近年来，随着互联网交易的普及，兴起以二手产品再使用为主要目标的互联网回收模式。为此，我们以工信部 EPR 试点企业为对象，重点考察以

华为为中心的废旧手机逆向物流创新商业模式。在全球电子废物管理的普遍要求下，华为在2013年启动“绿色行动”电子废弃物回收计划，2015年在国内推出“绿色行动2.0”计划，充分利用现有的线上销售渠道，与第三方专业回收平台——回收宝合作，进行废弃手机回收。图3显示华为作为生产者主导的互联网回收模式。

从逆向物流组织方式上来看，华为采用生产商回收处理和第三方回收处理共存的模式，其回收处理的路径有两条。一是华为+专业回收处理中心的路径，即华为作为生产商直接承担电子废弃物的回收工作，回收部门通过回收箱(国外)、上门+门店(国内)的方式从消费者手中回收旧手机，并以华为代金券作为奖励。收集的电子废弃物将统一送往专业的回收处理中心，进行材料回收和无害化处置。二是华为+回收宝的处理路径，作为专业的第三方平台，回收宝采用“以旧换新”的形式，将废旧手机

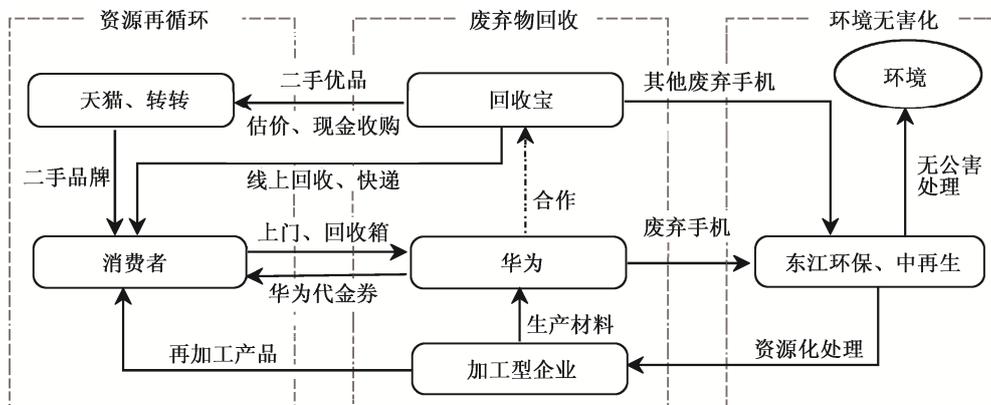


图 3 互联网回收模式流程
Fig. 3 Flow chart of internet recycling model

回收与华为的新产品销售相结合。用户无论线上还是线下购买新品,都可以通过网上下单,再利用快递交回旧手机,从而获得新品购买的优惠。回收宝将废弃手机进行鉴定分选,对于二手优品——损坏程度较低、功能齐全的品牌手机,进行基础的表面清理,并打上二手品标签,再通过转转等二手交易平台重新销售。与传统拆解作坊组装二手机再出售的不同之处在于,回收宝不会对出售的二手机进行任何拆机、维修和再组装,以避免二次销售中侵犯原生产企业的知识产权。同时,销售过程中向消费者充分明示二手机的状态和各种瑕疵,实现二手机销售的透明化。对于不符合二手机销售标准的回收产品,回收宝同样按照与生产者的契约,将废弃产品交给专业的回收处理厂,实现材料循环。在互联网平台的参与下,电子废物的产品和价值流向都更透明,从而为上下游企业合作挖掘产品再利用和循环处理的价值提供了保障。

华为的回收模式在近几年的实践中取得不错的成效,自从与回收宝合作进行废弃电子产品回收以来,已回收不限品牌的手机近5.3万台,其中98%进入循环再利用。结合华为日益增加的销售规模 and 市场份额,通过“以旧换新”回收废弃手机的数量有望继续增长,并带动现有手机销售。但是,这里隐含一个矛盾,EPR制度的初衷在于将生产者纳入废弃手机回收处理的过程中,以促进产品使用寿命的延长,节约资源消耗,而“以旧换新”尽管增加了手机使用的寿命,但这些产品在最终废弃后仍然需要环保化处理,因此,有必要综合考虑互联网回收的二手收益与最终环保化回收处理的成本。

2.4 现状

在目前的回收处理市场上,传统回收、环保化回收与互联网回收3种模式并存,各有利弊。随着市场竞争的不断加剧,模式自身及模式之间的矛盾日渐凸显。

1) 环保化回收的成本与收益矛盾。环保化回收主要针对废弃手机的最终处理,仅靠材料再循环的微薄收益,不足以弥补回收处理过程中的物流运输、拆解提炼等成本消耗,因此长期陷入入不敷出的窘境。

2) 激励性差异。环保化回收对消费者的激励较弱,提高消费者的环保意识,从而增加最终废弃后的产品流向规范处理厂,需要持续不断的宣传与投入。

3) 互联网回收模式中最终处理责任的问题。从生产者的角度看,对废弃物的有效回收和合理再利用已然是社会责任的体现,但就EPR的内涵而言,二手手机在最终废弃后仍然要经由环保化回收途径处理,生产者通过“以旧换新”的方式仅仅实现对废弃手机的有效回收,而将产品彻底报废后的最终处理责任仍然没有着落。

如果这几方面各自为政,分散治理,则市场主体更倾向追逐二手再利用市场的价值,最终废弃物的环保化处理则无法落实。为此,我们尝试从逆向物流的空间分析中测算几种模式物流成本,以期为基于EPR的逆向物流系统整合提供参考。

3 逆向物流空间分析

3.1 废弃手机产生量的空间分布

废旧手机产生量的预测是进行逆向物流成本分析的基础。目前,国内外有关废弃电子产品产生量的估算方法主要有市场供给模型、斯坦福模型、时间梯度模型、消费与使用模型和保有量系数模型等^[30]。由于缺乏国内地级市级别的手机销售量数据,因此本文采取数据易得的保有量系数模型,其中社会保有量的预测通过Gompertz模型实现。

Gompertz模型是常见的非线性拟合曲线之一,多用于预测因变量与自变量间的S型增长趋势。作为耐耗品,家用电器电子产品的社会保有量呈典型的S型增长,因此可用Gompertz模型做进一步的分析预测。以往的研究证明Gompertz模型在预测我国家用电器市场扩展方面有良好的适用性^[31]。黄庆等^[31]和刘志峰等^[32]还根据家电废弃量的各影响因子关联度分析,分别选取人均社会保有量作为自变量、人均GDP作为因变量进行家电保有量预测,模型表达式为

$$V(x) = \gamma \exp(\alpha \exp(\beta x)),$$

式中, $V(x)$ 表示废弃手机人均保有率(台/人); x 表示地区人均GDP(万元/人); γ 、 α 和 β 为模型待估参数,其中 γ 代表人均保有率的饱和水平。

以广东省2000—2015年统计年鉴中户籍人口、GDP、城市/农村每百户移动电话保有量等数据为基础,利用SPSS工具进行Gompertz模型拟合,非线性回归结果如表1所示。通过多次迭代, γ 取值为0.618时,决定系数最大, R^2 为0.976,模型总体拟合效果良好。

表 1 广东省 Gompertz 模型回归结果
Table 1 Regression results of Gompertz model

参数	估计值	95%置信区间		R ²
		下限	上限	
γ	0.618	0.584	0.651	0.976
α	-6.087	-8.866	-3.308	
β	-0.889	-1.111	-0.667	

通过二次指数平滑法外推2016—2020年广东省人口及人均GDP, 再利用Gompertz模型, 可估测得出2010—2020年广东省手机保有量。从表2可以看出, Gompertz模型的预测误差多在5%以内, 预测结果可靠。根据模型预测, 至2020年, 广东省手机社会保有量将达到5900万台。

基于手机社会保有量数据, 可采用保有量系数法估算广东省各年废弃手机产生量。预测思路是, 首先根据保有率的变化, 推算每年的新增保有量, 并假设电子电器产品在到达废弃年限之前的数年内报废概率相同, 再根据主要电子电器产品的使用年限进行废弃量估算。由于手机更新换代速度很快, 该方法能较好地把握手机更新换代的空分布情况。给定第 i 年的某电子产品社会保有量为 S_i , 假定其高峰报废年限区间为 $[m, n]$, n 为最长使用寿命, 此年限区间内对应的报废比率为 p , 则第 $i+n$ 年的电子产品废弃量 Q_{i+n} ^[33] 为:

$$Q_{i+n} = \frac{pS_i}{n-m}。$$

表 2 广东省 2010—2020 年手机保有量预测
Table 2 Mobile phone ownership of Guangdong Province in 2010-2020

年份	预测保有量/万部	实际保有量/万部	预测误差/%
2010	5009.673	4900.236	2.23
2011	5204.084	5505.246	-5.47
2012	5247.217	5663.371	-7.35
2013	5355.555	5124.446	4.51
2014	5454.364	5443.942	0.19
2015	5541.570	5646.441	-1.86
2016	5608.242	—	—
2017	5684.908	—	—
2018	5759.322	—	—
2019	5832.375	—	—
2020	5904.606	—	—

说明: 实际保有量数据来自《广东省统计年鉴》。

关于高峰报废年限及报废比率的选取, 根据问卷调查结果^[9], 智能手机的报废年限集中在3~5年之间, 报废比率取50%~60%较为合理, 由于手机近年来更新换代速度较快, 本文取 p 值为60%。结合前文 Gompertz 模型估测的保有量数据, 可得广东省2015—2025年手机废弃量预测结果。从表3可以看出, 广东省近十年手机废弃量都将持续增长, 至2020年废弃量能达到1662.471万台左右。

基于废弃总量数据, 可以初步考察废弃量的空分布情况。由于废弃量受人口和GDP的综合影响, Gompertz模型定量地描述了这一相关性。因此, 本文以Gompertz模型预估的人均社会保有率为权重来预测空分布格局。预测思路如下: 首先用2015年各市人口和GDP数据套用 Gompertz 模型, 得出各市的手机人均保有率; 再对所有市级人均保有率做均一化处理, 得出废弃量权重指数; 最后, 按权重分配废弃量, 以此预估的2020年广东省废弃量空分布如图4所示。

3.2 逆向物流成本-效益估算

基于前文估算得到的废旧手机产生量, 我们针对智能手机和传统功能手机在回收利用过程中的不同要求, 对不同回收模式下的逆向物流成本-效益进行估算。

3.2.1 智能机市场发展

回收的废弃手机中包含传统功能机与智能机, 由于二者存在再利用价值的差异, 因此在核算时需要分情景进行。传统功能机二手利用价值低, 少部

表 3 广东省 2015—2025 年手机废弃量预测
Table 3 Quantity of wasted mobile phones in Guangdong Province in 2015-2025

年份	废弃量预测/万部
2015	1502.902
2016	1561.225
2017	1574.165
2018	1606.667
2019	1636.309
2020	1662.471
2021	1682.472
2022	1705.472
2023	1727.797
2024	1749.713
2025	1771.381

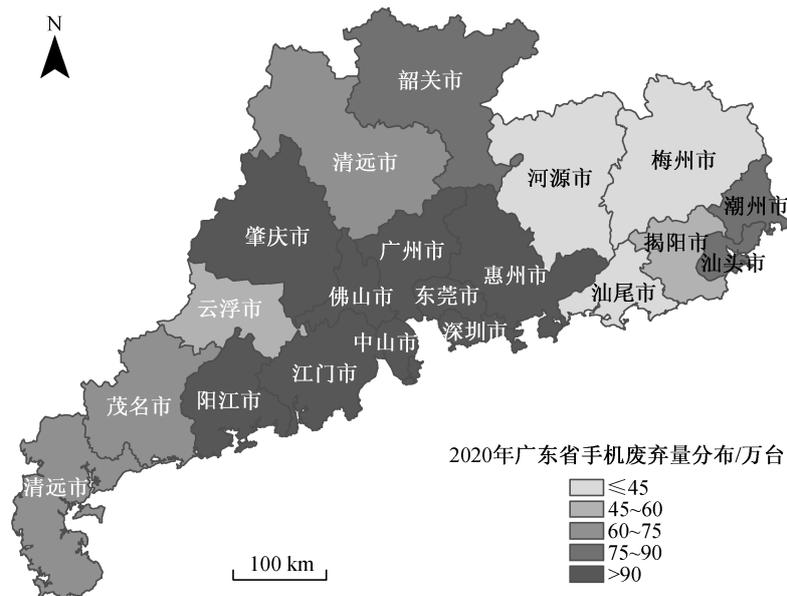


图4 广东省2020年手机废弃量空间分布

Fig. 4 Space distribution of wasted mobile phones in Guangdong Province in 2020

分能进行低端零部件再利用,大部分用于材料回收,因此均按环保化处理的方式估算成本。智能机更新换代频繁,存在价值再创造空间,首先可通过互联网回收模式进行成本-收益估算,随着使用时间的延长,智能机达到最大使用年限后仍需要通过环保化回收处理,此时只考虑物流成本。我们依据《移动终端白皮书》^①、ICT深度观察^②等文献,梳理了近年来智能机市场占有率的发展趋势(图5),可以看出智能机的推广分为3个阶段。第一阶段为2000—

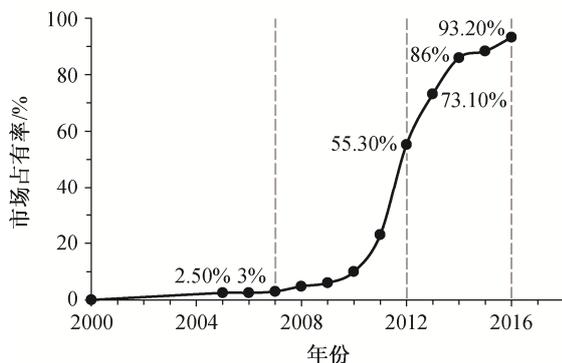


图5 中国智能机市场占有率发展趋势

Fig. 5 The market share of smart phones in china

2007年,智能机2000年出现于中国市场,此时仍是功能机当道,智能机市场发展缓慢。直到2007年iPhone 1在美国上市,引领智能机的发展潮流。在智能机快速发展的第二阶段(2007—2012年),中国智能机市场迅速扩张,2012年已实现智能机的大众普及。在2012年之后的第三阶段,智能机增速放缓,市场趋于饱和,截至2016年,智能机市场占有率已超过90%。

3.2.2 环保化回收模式成本估算

环保化回收模式的处理对象是废弃功能机和最终废弃的智能机。本文以县为单位,估算2001—2015年累积保有量的回收处理成本。目前主要的运输情景有两种:一是参照用户自主交投的模式,直接以门到门的方式进行收集;另一种是EPR系统与城市废物管理系统合作,每个县级行政单元产生的废弃物混合在城市垃圾清运系统中,再由垃圾站集中分拣后,运往规范处理厂,仅考虑县级集中处理中心到处理厂的运输成本。

首先,参考国内典型物流公司的公路运输成本,获得广东省各县之间的公路运输成本矩阵。

然后,考虑运输重量。从市场上公布的手机数据来看,目前智能手机的重量基本上在100~150 g

① 中国工业和信息化部电信研究院. 移动终端白皮书2012. <http://www.miit.gov.cn/n1146312/n1146909/n1146991/n1648536/c3489485/content.html>

② 中国信息通信研究院. ICT深度观察. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/sdgc/>

之间, 本文取手机平均重量为 125 g。

最后, 考虑运输距离。以广东省经过资格审核的废弃电器电子产品处理企业为处理厂的选址。据广东省环境保护厅的最新公示, 目前广东省内此类企业有 5 家, 分别为佛山市顺德鑫还宝资源利用有限公司、广东赢家环保科技有限公司(佛山市)、清远市东江环保技术有限公司、汕头市 TCL 德庆环保发展有限公司和茂名天保再生资源发展有限公司, 分布在佛山市顺德区、佛山市南海市、清远市清城区、汕头市潮阳区和茂名市茂南区。

进一步利用 ArcGIS10.2, 运用泰森多边形的方法, 以各县区行政单元与上述 4 家处理厂的距离为依据进行服务区划分: 假设 i 市废弃手机总重量为 m_i , 该市到 4 家处理厂的距离为 $d_i^n (n \in (1,4))$ 。服务区划分满足:

$$\min \sum_{i=1}^{127} m_i d_i,$$

$$d_i = \min(d_i^n (n \in (1,4))).$$

划分结果如图 6 所示, 其中佛山区的两家处理厂集中了广州、东莞、佛山和深圳等电子生产大市的废弃手机, 出于简化考虑, 数据估算时并为一处。

通过估算, 基于人口和 GDP 估算的 2001—2015

年广东省累计手机保有量约为 17438.18 万台, 门到门的公路物流成本约为 1544.99 万元, 免费集中后的成本约为 190.97 万元, 可见集中后的物流成本显著低于门到门的物流成本。然而目前常见的仍然是门对门的物流方式, 说明逆向物流若能与城市废物管理系统合作, 则可以大大降低回收的物流成本。

3.2.3 互联网回收模式成本-收益估算

互联网回收模式通过对废弃手机剩余价值的再创造获得高额的收益, 但同时面临高昂的快递物流成本。以一台废弃智能手机为例, 消费者最初需要通过快递物流的方式将废弃手机运往生产者或第三方平台。按目前顺丰、圆通、韵达、德邦等大型物流公司对小件物流的收费标准, 1 kg (约 8 部废弃手机重量) 以内的单件快递, 运往省内的费用约为 8~10 元, 运往省外的费用约为 10~15 元。尽管互联网回收的单件物流成本远高于环保化回收, 但如果二手手机销售的效益较高, 物流成本就显得不那么重要。例如, 回收宝在对回收的废旧手机进行基础的外观保养后, 通过转转等二手平台进行销售。表 4 列出转转平台上主流品牌及型号的二手手机售价, 总体均价在 2000 元左右。除去回收、快递物流、产品质检、人工修复等成本, 互联网回收模式下每台二手手机能创造约 800 元左右的利润。

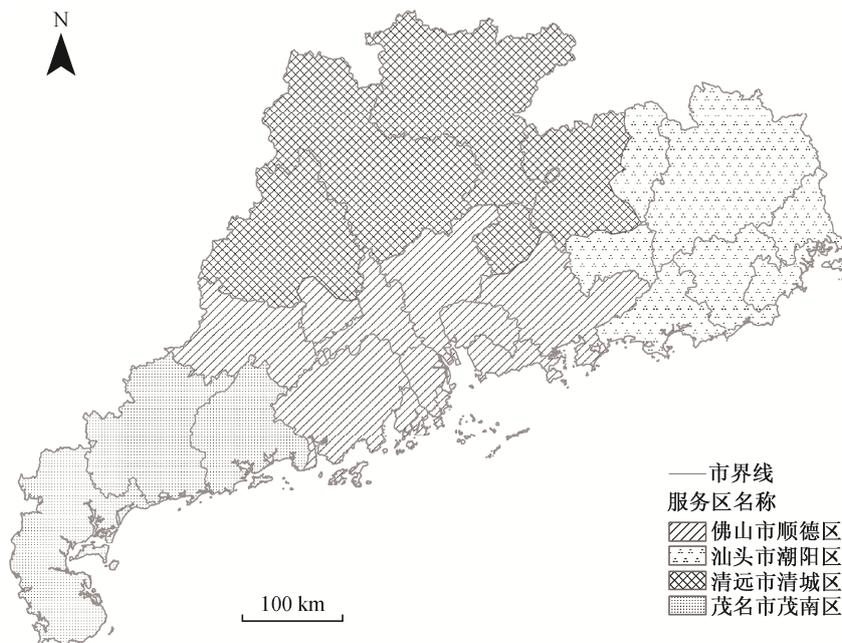


图 6 广东省废旧手机服务区划分
Fig. 6 Service area of recycle centers in Guangdong Province

表4 转转平台上二手手机售价情况

Table 4 Prices of second-hand mobile phones in Zhuanzhuan

品牌型号	价格/元	
	九成新	八成新
iPhone 6s	3050	2300~3000
iPhone 6	1900~2800	1820~2350
iPhone 5s	1300~1550	1200~1400
华为 P9	2650	—
华为 Mate8	2100~2700	—
小米 5	1388	—
OPPO R9s	2088	—
OPPO R9	1750	—
Vivo X7s	1999	—

说明：数据来自转转二手平台APP。

基于前文的估算，2015年广东省智能机保有量为4893.21万台，2014年为4690.75万台，则2015年新增智能机保有量202.45万台。目前国内智能手机更换频率在1年以内的人数占30%^[9]，但这部分闲置手机并不能全部回收。依据对华为的访谈数据，将回收比例设为10%，即2015年大概有6万台手机能在一年后进入二手销售，以800元/台为平均收益，则保守估算的总收益可达4800万元。相比前述1544.99万元的环保化回收成本，互联网回收的收益足以弥补环保化回收的逆向物流成本。

4 结论与展望

电子废物回收和循环处理中的环境问题已经得到广泛的重视。作为全球最大的电子产品生产地，广东省在电子产品全生命周期环境管理方面做了长期的探索。随着手机被纳入第二批废弃电气电子产品回收管理目录，建立有效的废弃手机环保化回收处理体系已经迫在眉睫。与第一批列入目录的“四机一脑”产品相比，手机产品重量轻，更新换代快，再利用方式多样，因此不能简单地延续“四机一脑”的回收管理模式。

本文总结了目前存在的3种主要的手机回收模式，其中，传统化回收模式具有高激励性、高效率的优点，已发展成熟，但存在较大的环境风险；环保化回收模式目前对消费者和回收处理企业都存在激励不足的问题，最终产品废弃后环保处理责任缺失；以二手产品销售为主要目标的互联网回收模式引起企业和投资者的广泛关注，二手利用市场利润

较高，但复杂的二手销售市场令最终产品废弃后的环保化处理责任划分更加模糊了。

为此，在手机回收体系的建构中，必须贯彻EPR的原则，让品牌企业在串联整个逆向物流系统中发挥供应链整合的作用，使互联网回收模式的收益与环保化处理的成本得到统筹兼顾。

最后，在EPR系统的建立过程中，也需要考虑如何与传统城市废物管理系统合作。从物流成本角度，通过传统城市废物管理系统集中收集最终废弃产品具有明显的成本优势，但是要发挥传统城市废物管理系统的作用，消费者源头分类的配合就十分关键。总之，电子产业的全球市场竞争迫使中国企业在环保要求上也努力与全球最高标准对接。通过EPR制度，这种努力有望转变为激励国内相关管理体系转型的契机。

参考文献

- [1] Lindhqvist T. Extended producer responsibility in cleaner production: policy principle to promote environmental improvements of product systems. Lund: IIIIEE, 2000
- [2] Walls M. Extended producer responsibility and product design: economic theory and selected case studies. Washington DC: RFF Discussion Paper, 2006
- [3] Runkel M. Product durability and extended producer responsibility in solid waste management. *Environmental and Resource Economics*, 2003, 24(2): 161-182
- [4] Lindhqvist T, Lifset R. Can we take the concept of individual producer responsibility from theory to practice?. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, 7(2): 3-6
- [5] 王喜. 基于 GIS 的上海市电子废弃物回收网络体系研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007
- [6] 李芋蓁. 电器电子产品生产者责任延伸制度研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012
- [7] 唐绍均. 生产者责任延伸(EPR)制度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007
- [8] 陈殷源. EPR 制度与我国电子废弃物管理. *环境保护与循环经济*, 2008, 28(11): 8-10
- [9] 李博, 杨建新, 吕彬, 等. 中国废旧手机产生量时空分布研究. *环境科学学报*, 2015, 35(12): 4095-4101
- [10] 李博, 杨建新, 吕彬, 等. 废弃电器电子产品产生量估算——方法综述与选择策略. *生态学报*, 2015,

- 35(24): 7965-7973
- [11] 张东萍, 肖岳峰. 广西电子废弃物产生量预测. 物流科技, 2010, 33(1): 21-23
- [12] 童昕. 论电子废物管理中的延伸生产者责任原则. 中国环境管理, 2003(1): 1-4
- [13] 廖程浩, 张永波. 废旧手机产生量测算方法比较研究. 生态经济, 2012(3): 124-126
- [14] 吕彬, 杨建新, 宋小龙. 生命周期社会影响评价及其在电子废物管理中的应用. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(专刊): 217-221
- [15] 何文胜. EPR 制度下废旧家电回收主体的利益博弈与激励机制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009
- [16] 周杰, 陶晓芳. 生产者责任延伸制下销售-回收型闭环供应链收益共享契约研究. 科学决策, 2016(2): 39-57
- [17] 任鸣鸣, 杨雪, 鲁梦昕, 等. 考虑零售商自利的电子废弃物回收激励契约设计. 管理学报, 2016, 13(2): 285-294
- [18] 张伟, 蒋洪强, 王金南, 等. 我国主要电子废弃物产生量预测及特征分析. 环境科学与技术, 2013(6): 195-199
- [19] 张克勇. 山西省主要电子废弃物产生量估算研究. 现代工业经济和信息化, 2014, 4(13): 156-158
- [20] 王爱珍. EPR 下电子产品的逆向物流回收模式及供应商评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014
- [21] 王茵. EPR 制度下废旧家电回收处理模式及回收渠道决策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008
- [22] 袁歌阳. 生产者延伸责任制度下废弃电器电子产品回收模式研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2012
- [23] 郑秀君, 王景伟. 循环经济理念下的废旧手机资源化模式探讨. 生态经济, 2014, 30(2): 30-36
- [24] Yan G, Huang C J, Hong Z, et al. Heavy metal contamination from electronic waste recycling at Guiyu, southeastern China. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(4): 1617-1626
- [25] 余莉萍, 李会茹, 孟祥周, 等. 电子垃圾焚烧排放的二噁英对周围大气环境的影响. 环境污染与防治, 2008, 30(2): 8-11
- [26] 罗勇, 余晓华, 杨中艺, 等. 电子废物不当处置的重金属污染及其环境风险评价 I. 电子废物焚烧迹地的重金属污染. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 34-41
- [27] 宋杨, 吴南翔, 韩见龙, 等. 某电子垃圾拆解地鲫鱼和鸡蛋中二噁英和多氯联苯的污染状况研究. 环境与健康杂志, 2011, 28(4): 328-331
- [28] Zheng L, Wu K, Li Y, et al. Blood lead and cadmium levels and relevant factors among children from an e-waste recycling town in China. *Environmental Research*, 2008, 108(1): 15-20
- [29] 王福彦, 梁勇, 陈征燕, 等. 电子废物中持久性有机污染物对健康影响的调查. 中国热带医学, 2010, 10(3): 391-392
- [30] Oguchi M, Murakami S, Tasaki T, et al. Lifespan of commodities, Part II. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14(4): 613-626
- [31] 黄庆, 王成璋, 宗瑞兴. 家电产品市场扩展分析. 电子科技大学学报, 2000, 29(1): 95-99
- [32] 刘志峰, 薛雅琼, 黄海鸿. 我国大陆地区电器电子产品报废量预测研究. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1875-1882
- [33] 童昕, 蔡一帆, 颜琳. 基于“家电以旧换新”回收数据评估电子废物产生量估算方法. 生态经济, 2013(7): 38-42