

DOI: 10.5846/stxb201408171623

李博,杨建新,吕彬,宋小龙.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): - .

Li B, Yang J X, Lv B, Song X L. Generation estimation of waste electrical and electronic equipment: methods review and selection strategy. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

## 废弃电器电子产品产生量估算:方法综述与选择策略

李 博<sup>1</sup>, 杨建新<sup>1,\*</sup>, 吕 彬<sup>1</sup>, 宋小龙<sup>2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 上海第二工业大学 上海电子废弃物资源化产学研合作开发中心, 上海 201209

**摘要:**开展废弃电器电子产品产生量估算是对其进行可持续管理的基础研究领域之一。选择适宜的估算方法与提高数据质量是废弃电器电子产品产生量估算工作中需要解决的关键问题。本文全面总结了国内外现有废弃电器电子产品产生量估算方法的研发背景、估算模型、输入参数与应用实例,对比分析了不同方法的数据需求与适用条件,进而探讨了废弃电器电子产品产生量估算方法的选择策略,即综合考虑估算对象的系统边界、产品类别、数据来源与质量等特征选择适宜的估算方法。本文可以为废弃电器电子产品产生量的估算和可持续管理提供理论支撑。

**关键词:**废弃电器电子产品;电子废弃物;产生量;估算方法;选择策略

## Generation estimation of waste electrical and electronic equipment: methods review and selection strategy

LI Bo<sup>1</sup>, YANG Jianxin<sup>1,\*</sup>, LV Bin<sup>1</sup>, SONG Xiaolong<sup>2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Shanghai Cooperative Centre for WEEE Recycling, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China

**Abstract:** The generation estimation can provide fundamental information to construct a sustainable management system of waste electrical and electronic equipment (WEEE). However, the reliable estimation result is difficult to obtain and verify. The selection of proper approach and the improvement of data quality are both key issues for improving the generation estimation of WEEE. The present work analyzed the methodologies and applications of the generation estimation of WEEE and identified the data requirements and appropriate application conditions for each method. The selection strategy was analyzed to provide authentic estimations and sustainable management of WEEE.

**Key Words:** waste electrical and electronic equipment (WEEE); e-waste; generation amount; estimation methods; selection strategy

伴随着国民经济的快速发展和电子信息产业技术水平的不断提高,电器电子产品更换和废弃的速度越来越快,产生了数量巨大的废弃电器电子产品(Waste Electrical and Electronic Equipment,简称WEEE)。广义的废弃电器电子产品(电子废弃物)涵盖了全部品类的依靠电流或电磁场进行工作的以及产生、转换与测量电流或电磁场的废弃设备。由于兼具资源再生与环境污染的双重潜力,废弃电器电子产品受到了国际社会的广

基金项目:中国科学院生态环境研究中心“一三五”项目课题(YSW2013B04-03)

收稿日期:2014-08-17; 网络出版日期:2015- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjx@rcees.ac.cn

泛关注<sup>[1-6]</sup>。

产生量是废弃电器电子产品管理的重要基础信息。目前国内外有关废弃电器电子产品产生量的数据主要通过估算获得,估算结果的可靠性有待提高<sup>[7]</sup>。本文尝试归纳现有废弃电器电子产品产生量估算方法,分析不同估算方法的数据需求与适用条件,识别存在的主要问题,提出相应的改进建议,以期为废弃电器电子产品产生量估算方法的选择和应用提供参考。

## 1 废弃电器电子产品产生量估算方法

根据现有废弃电器电子产品产生量估算方法在设计思路、数据需求与适用范围等方面的差异,可以将其归纳为以下 13 种。

### 1.1 市场供给模型(Market supply method)

该方法根据某一类别电器电子产品的销售量和平均使用寿命来估算其废弃量。假设某一类别电器电子产品的平均使用寿命不随时间推移和技术更新而变化,则该类产品在寿命期内一直处于被使用状态;到达平均使用寿命时,该产品一次性全部退出使用状态,成为废弃物。估算公式为:

$$Q_t = S_n$$

其中, $Q_t$ 为某一年份某一类别废弃电器电子产品的产生量; $S_n$ 为  $n$  年前该类产品的销售量; $n$  为该类产品的平均使用寿命。

该方法简便易用,可以快速估算废弃电器电子产品产生量,最早用于估算德国废弃电器电子产品产生量<sup>[8]</sup>。但由于没有考虑科技进步和经济发展引起的电器电子产品平均使用寿命的变化,因此并不适用于电脑、手机等技术更新频繁的电器电子产品废弃量的估算,近年来基于该方法的应用实例越发少见<sup>[9-10]</sup>。

除常用英文名外,亦有文献将此方法称为 Classic market supply method<sup>[11]</sup>,Sales<sup>[12]</sup>和 Simple delay<sup>[12]</sup>等。

### 1.2 市场供给 A 模型(Market supply A method)

该方法是对市场供给模型的改进。认为电器电子产品并非在到达平均使用寿命时一次性的全部被废弃,而是按照一定比例围绕平均使用寿命渐次退出使用状态。有研究表明,产品的实际使用寿命围绕平均使用寿命呈正态分布<sup>[13]</sup>。估算公式为:

$$Q_t = \sum S_i \cdot P_i$$

其中, $Q_t$ 为某一年份某一类别废弃电器电子产品的产生量; $S_i$ 为  $i$  年前该类产品的销售量; $P_i$ 为实际使用寿命为  $i$  年的该类产品的比例。

该方法在一定程度上弥补了市场供给模型的不足,提高了估算结果的准确性,因而得到了较多的应用实例。但是不同地区、不同时期内某一类电器电子产品的寿命分布( $P_i$ )不易获得,限制了该方法的应用。具体应用中,Xianbing Liu 等利用该方法估算了北京市 2003—2020 年的电视、电脑、冰箱、空调和洗衣机的废弃量<sup>[14]</sup>;高颖楠等估算了我国 2010—2020 年的废弃手机产生量<sup>[15]</sup>;Polak 等估算了捷克 1995—2020 年的废弃手机产生量<sup>[12]</sup>。

除常用英文名外,亦有文献将此方法称为 Distribution delay<sup>[12]</sup>。

### 1.3 斯坦福模型(Stanford method)

该方法基于美国电脑行业的调查数据对市场供给 A 模型进行了改进<sup>[8]</sup>。市场供给 A 模型中的寿命分布  $P_i$  是定值,而斯坦福模型中的  $P_i$  是变化的,即不同年份销售的某一类别电器电子产品的寿命分布不同。

该模型适用于估算电脑、手机等技术更新频繁的电器电子产品的废弃量。但是,如何获取不同地区、不同时期内某一类别电器电子产品的寿命分布( $P_i$ )的问题同样限制着斯坦福模型的应用。具体应用中,Wilkinson 等利用包括斯坦福模型在内的七种方法估算了爱尔兰 1991—2000 年的废弃电视、电脑、冰箱和烤箱的产生量<sup>[8]</sup>;刘小丽等利用斯坦福模型对我国 2000—2010 年电视、电脑、冰箱、空调和洗衣机的年度废弃量进行了估算<sup>[16]</sup>;林逢春等估算了 1991—2010 年我国的废弃电脑年度产生量<sup>[17]</sup>。

#### 1.4 卡内基梅隆模型(Carnegie Mellon method)

该方法以某一类别电器电子产品的销售量和寿命分布作为基本参数,通过考虑电器电子产品废弃后处置方式的差异实现了对市场供给模型的修正。

该方法考虑了消费者行为差异导致电器电子产品废弃后的不同处理处置方式(分为再使用、闲置、材料再生和填埋等四种)及其比例<sup>[18]</sup>。该方法的优点是估算结果更加贴近实际情况,不足在于废弃电器电子产品进入不同处理处置方式的比例难以确定,所以现有应用实例不多<sup>[19]</sup>。

#### 1.5 消费与使用模型(Consumption and use approach)

该模型以某一类别电器电子产品的社会保有量和平均使用寿命为基础数据,对于平均使用寿命不变的产品,两者的比值即为废弃量。估算公式为:

$$Q_t = H_{(household+organization)} / n$$

其中, $Q_t$ 为某一年份某一类别废弃电器电子产品的产生量; $H$ 为同年该类产品的社会保有量,分为家庭保有量和组织保有量两部分,分别用 *household* 和 *organization* 表示; $n$  为该类产品的平均使用寿命。

该方法简便易用,但是没有考虑科技进步和经济发展引发的电器电子产品平均使用寿命的变化,会在一定程度上影响估算结果的准确性,故应用实例较少<sup>[20-21]</sup>。但是,对于缺乏准确销售量数据的区域尺度则只能利用该方法进行估算<sup>[22-23]</sup>。

除常用英文名外,亦有文献将此方法称为 Approximation<sup>[24]</sup>, Estimate formula<sup>[8]</sup>, Batch leaching<sup>[12]</sup> 和 Stock&lifetime<sup>[12]</sup> 等。

#### 1.6 时间梯度模型(Time-step method)

也被称为“时间阶段模型”。该方法以某一类别电器电子产品的社会保有量和销售量为基础数据,考虑进入和退出保有量的产品数量,假设初始年份之前的废弃物产生量为零,利用归纳法的思想进行估算。估算公式为:

$$Q_t = \sum S_n - (H_t - H_{t'})_{(household+organization)} - \sum Q_n, (n = t' + 1 \text{ to } t, t' < t)$$

其中, $Q_t$ 和 $Q_n$ 分别代表 $t$ 年和 $n$ 年的某一类别废弃电器电子产品的产生量; $H$ 为该类产品的社会保有量,分为家庭保有量和组织保有量两部分,分别用 *household* 和 *organization* 表示; $S_n$ 为 $n$ 年的产品销售量; $t'$ 为输入数据起始年份。

该方法涉及的参数较多,不同种类的电器电子产品在家庭和组织中的用途和保有情况不一,需要根据实际情况区别对待。应用实例中廖程浩和张永波基于同一套销售量数据,分别采用时间梯度模型、市场供给模型以及消费与使用模型对 2005—2010 年我国废弃手机产生量进行了估算<sup>[25]</sup>; Araujo 等利用该方法估算了巴西市场不饱和电器电子产品(电脑和手机)的废弃量<sup>[3]</sup>。

#### 1.7 MFA 模型(MFA method)

该方法基于物料守恒原理,将某一类别电器电子产品的社会保有量视为一个整体,基于社会保有量的变化和一定时间内的销售量对废弃量进行估算。估算公式为:

$$Q_t = S_t - \Delta H_{(household+organization)}$$

其中, $Q_t$ 为某一时期某一类别废弃电器电子产品的产生量; $S_t$ 为同期该类产品的销售量; $\Delta H$ 为同期该类产品社会保有量的变化,分为家庭保有量和组织保有量两部分,分别用 *household* 和 *organization* 表示。从形式上看,该方法类似于简化的时间梯度模型,但是其设计思路却不尽相同。

该方法涉及参数少,估算过程简便,在近年获得了较多的应用,但是对于“库容”或者社会保有量无法确定的电器电子产品类别的废弃物产生量估算工作则无能为力。例如,Jinglei Yu 和 Yan Yang 等分别应用该方法估算了世界范围<sup>[26]</sup>和美国国内<sup>[27]</sup>的废弃电脑产生量;Ling Zhang 等估算了我国 2010—2030 年<sup>[28]</sup>和南京市 2009—2050 年<sup>[29]</sup>废弃电视、电脑、冰箱、空调和洗衣机的产生量;Bernhard Steubing 等基于该方法估算了 2009—2020 年智利的废弃电脑产生量<sup>[30]</sup>;Chun-hsu Lin 估算了台湾 1997—2005 年废弃电视、冰箱、空调和洗

衣机的产生量<sup>[31]</sup>; Hai-Yong Kang 和 Julie M. Schoenung 估算了美国加利福尼亚州 2000—2012 年废弃电脑中央处理器、CRT 和 LCD 显示器的产生量<sup>[32]</sup>; Yong-Chul Jang 和 Jinglei Yu 等分别应用该方法估算了韩国<sup>[33]</sup>和中国<sup>[34]</sup>的废弃手机产生量。

### 1.8 饱和市场模型(ICER model)

该方法基于市场供给模型,以某一类别电器电子产品的销售量为基础数据,假设处于使用状态的产品数量已经达到饱和,利用产品替换率估算废弃量<sup>[35]</sup>。估算公式为:

$$Q_t = S_t \cdot F_s$$

其中, $Q_t$ 为某一时期某一类别废弃电器电子产品的产生量; $S_t$ 为同期该类产品的销售量; $F_s$ 为饱和因子(Saturation factor),即产品的替换率,指可能造成同类产品废弃的电器电子产品占该类产品销售量的比例,例如若  $F_s = 0.6$ ,则表示新销售的某类电器电子产品中有 60%将替换现有社会保有量中的同类产品,剩余的 40%将导致社会保有量增加。

该方法计算简便,但饱和因子的数值难以获得,限制了其应用。有研究表明,饱和因子随着市场的饱和与技术的进步有升高的趋势。极端情况下,饱和因子  $F_s = 1$ ,即在某一时间段内销售某一类别的电器电子产品完全替代在用同类产品,这时产品的销售量即等于同一时间段内同类产品的废弃量,这种情况是饱和市场模型的一个特例:完全饱和模型(Complete saturation method)<sup>[36]</sup>。

### 1.9 时间序列模型(Time-series model)

该类方法的设计思路为应用不同函数,将时间作为预测变量(Predictor variable),输入年度、月度或者其他时间尺度的废弃物产生量,用时间序列居前的已知数据推导时间序列居后的未知数据。

时间序列模型具体可以分为曲线估算方法(Curve estimation techniques)、指数平滑方法(Exponential smooth)、线性外推方法(Linear extrapolation)、趋势分析方法(Trend analysis)、周期性方法(Periodic approaches)和自回归求和移动平均模型(Auto-regressive integrated moving average model)等。

时间序列模型的优势在于其良好的适应性和简单的数据需求。通常任何有意义或者可获得的时间尺度上的废弃物产生量都可以作为输入数据,因此简化了估算流程,便于应用。但在另一方面,较低水平的数据需求无法保证估算结果的可靠性,因为过去的无法考虑未来可能发生的由于技术进步等情况引起的产品替代。因此,该类方法通常至少需要输入 50—100 组观测数据以保证估算结果准确性。应用实例有联合国大学(United Nations University)介绍的一种基于迭代接近方法(Iterative approach)的废弃电器电子产品产生量估算方法<sup>[37]</sup>以及 Keijiro Masui 利用多元回归分析估算废弃空调的产生量<sup>[38]</sup>。

在已有研究中,本类方法更多的被用于在废弃电器电子产品产生量估算中对于基础数据的处理方面,例如 Osibanjo 等应用回归分析(Regression)拟合了尼日利亚和美国的移动电话渗透率,作为废弃手机产生量估算的基础数据<sup>[21]</sup>;高颖楠等应用回归分析基于 1998—2009 年我国手机销售量预测了 2010—2020 年我国手机销售量,并在此基础上利用市场供给 A 模型估算了我国 2010—2020 年的废弃手机产生量<sup>[15]</sup>;Jinglei Yu, Yan Yang 和 Dwivedy 等分别基于描述种群生长情况的逻辑斯蒂方程(Logistics model)估算了世界范围<sup>[26]</sup>、美国<sup>[27]</sup>和印度<sup>[39]</sup>的电脑渗透率,并在此基础上应用 MFA 模型估算了相应的废弃电脑产生量;冈珀茨曲线(Gompertz curve)<sup>[7, 27, 40]</sup>,费雪-派模型(Fisher-Pry model)<sup>[40-42]</sup>和巴斯模型(Bass model)<sup>[40, 43]</sup>等方法可以用于估算技术进步产生的替代作用;威布尔分布(Weibull distribution)则可以用于估算电器电子产品的寿命分布<sup>[12, 29, 41]</sup>。

除常用英文名外,亦有文献将此类方法称为 Projection<sup>[7]</sup>。

### 1.10 因子模型(Factor model)

因子模型只考虑电器电子产品生命周期中的废弃阶段,试图通过解释和定量分析影响废弃物产生过程的各种因子而估算废弃物的产生量。

该方法一般分为三个步骤,分别为:定性识别影响因子,确定影响因子与废弃物产生量间的定量关系,设



置合理情景进行估算<sup>[44]</sup>。影响产品废弃的因子很多,例如居民消费价格指数(Consumer price index)、国内生产总值(Gross domestic product)等宏观经济数据以及研究区域的居民年龄构成、受教育程度、收入情况和家庭结构等微观统计数据。其中多项因子可以精确量化<sup>[45]</sup>,某些因子也可以通过情景设置得以量化,从而使利用因子模型估算废弃电器电子产品的产生量成为可能<sup>[46]</sup>。但是,诸如消费者行为等间接因子则难以量化。

参数众多、结构复杂等特点限制了因子模型在废弃电器电子产品产生量估算工作中的实际应用,建立普适性的模型框架和影响因子量化流程是因子模型贴近实际应用的关键。在具体应用中,Shan-shan Chung 等通过问卷调查的结果研究了不同因子对于香港家庭电器电子产品保有量的影响,在此基础上估算了香港的废弃电器电子产品产生量<sup>[23]</sup>;Saphores 等通过问卷调查的方法确定影响因子的数值,进而估算了 2006 年美国家庭闲置的电器电子产品数量<sup>[47]</sup>。

### 1.11 计量经济学分析(Econometric analysis)

计量经济学分析指基于国内生产总值等经济学指标估算社会消费行为的分析方法<sup>[48]</sup>。该方法通过在已有废弃电器电子产品产生量与未来经济学指标的预测值间建立定量关系估算未来的废弃电器电子产品产生量。

该方法的应用过程通常包括以下三个步骤:根据经济理论构建一个计量经济学联立方程;使用统计数据测试方程,确保提出的方程能拟合数据;假设方程在未来不变,依据此方程做出预测。数据需求则包括研究区域和特定时段内的居民收入水平和物价水平等参数,技术进步也是需要考虑的关键因素。现阶段,计量经济学分析在估算废弃电器电子产品产生量方面的应用实例较少,例如丹麦环境保护署<sup>[49]</sup>和挪威中央统计局<sup>[50]</sup>的相关工作。

### 1.12 使用阶段分析(Use-phase analysis)

该方法需要考虑三个方面的因素:电器电子产品的寿命分布、社会保有量和技术进步引发的产品替代效应<sup>[7]</sup>。

该方法对于输入数据精度要求高,例如寿命分布和替代效应分别需要使用威布尔分布和费雪-派模型等方法计算,由此导致计算过程相对复杂,应用实例较少。例如,Walk 基于该方法估算了德国巴登-符腾堡州 2000-2015 年家用 CRT 显示器的废弃量<sup>[41]</sup>。

### 1.13 直接分析法(Direct waste analysis method)

直接分析法是一种很少被提及的废弃电器电子产品产生量估算方法,该方法基于从废弃电器电子产品回收网点或处理设施处采集的产品回收数据分析总体产生量。

该方法对于输入数据的精确度要求高,适用于具有完善的废弃电器电子产品管理体系的国家和地区。例如中国香港特别行政区政府就利用该方法估算了城区废弃电器电子产品的产生数量,取得了较好效果<sup>[51]</sup>;Feszty 等综合废弃电器电子产品回收数据,估算了欧盟规定回收的十类废弃电器电子产品在英国的产生量,在此基础上基于苏格兰在英国的人口比例估算了其废弃电器电子产品产生量<sup>[52]</sup>。

除常用英文名外,亦有文献将此方法称为 Waste facility record compilation<sup>[7]</sup>。

## 2 废弃电器电子产品产生量估算方法的选择策略

各种废弃电器电子产品产生量估算方法因为其自身不同的设计思路与数据需求而具有不同的特点,不同方法的数据需求详见表 1。理论上,上述方法均可用于各类电器电子产品的废弃量估算;实际应用中,估算方法的选择受到系统边界、参数设置与数据来源等因素的共同影响,以具体情景下的主观选择为主。目前为止,文献中尚未见报道通用型废弃电器电子产品产生量估算方法的选择策略。

为了提高废弃电器电子产品产生量估算结果的准确性,本研究尝试提出废弃电器电子产品估算方法的一般性选择策略。该策略基于系统边界、产品类别、数据来源等估算过程特征,探讨了适宜估算方法的选择流程。

表 1 废弃电器电子产品产生量估算方法的数据需求

|                                            | 销售量<br>(产量、<br>进出口量)<br>Sales<br>( Production,<br>import and<br>export ) | 寿命分布<br>(使用寿命)<br>Lifetime<br>distribution<br>( lifetime) | 社会<br>保有量<br>Possession | 历史废弃物<br>数据<br>Historical<br>collected<br>/generation<br>amount | 饱和<br>因子<br>Saturation<br>factor | 替代<br>效应<br>Substitution<br>effect | 影响<br>因子<br>Influential<br>factors | 计量经济学<br>指标<br>Econometric<br>indicators |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|
| 市场供给模型<br>Market supply method             | √                                                                        | √                                                         |                         |                                                                 |                                  |                                    |                                    |                                          |
| 市场供给 A 模型<br>Market supply A method        | √                                                                        | √                                                         |                         |                                                                 |                                  |                                    |                                    |                                          |
| 斯坦福模型<br>Stanford method                   | √                                                                        | √                                                         |                         |                                                                 |                                  |                                    |                                    |                                          |
| 卡内基梅隆模型<br>Carnegie Mellon method          | √                                                                        | √                                                         |                         |                                                                 |                                  |                                    |                                    |                                          |
| 消费与使用模型<br>Consumption and use<br>approach |                                                                          | √                                                         | √                       |                                                                 |                                  |                                    |                                    |                                          |
| 时间梯度模型<br>Time-step method                 | √                                                                        |                                                           | √                       | √                                                               |                                  |                                    |                                    |                                          |
| MFA 模型<br>MFA method                       | √                                                                        |                                                           | √                       |                                                                 |                                  |                                    |                                    |                                          |
| 饱和市场模型<br>ICER model                       | √                                                                        |                                                           |                         |                                                                 | √                                |                                    |                                    |                                          |
| 使用阶段分析<br>Use-phase analysis               |                                                                          | √                                                         | √                       |                                                                 |                                  | √                                  |                                    |                                          |
| 时间序列模型<br>Time-series model                |                                                                          |                                                           |                         | √                                                               |                                  |                                    |                                    |                                          |
| 因子模型<br>Factor model                       |                                                                          |                                                           |                         | √                                                               |                                  |                                    | √                                  |                                          |
| 计量经济学分析<br>Econometric analysis            |                                                                          |                                                           |                         |                                                                 |                                  |                                    |                                    | √                                        |
| 直接分析法<br>Direct waste analysis<br>method   |                                                                          |                                                           |                         | √                                                               |                                  |                                    |                                    |                                          |

2.1 系统边界

根据废弃电器电子产品产生量估算的系统边界,进行估算方法的初步选择。

时间尺度方面,若需要对未来的产生量进行预测,则需要考虑时间序列模型、使用阶段分析、计量经济学分析等方法。

空间尺度方面,针对国家尺度的估算通常不会因为数据可获性影响估算方法的选择;针对区域尺度(地区、省、市、自治区等)的社会保有量和销售量数据通常不易获得,因而限制了消费与使用模型、时间梯度模型、MFA 模型以及使用阶段分析等方法的应用。

国别方面,若估算对象为发展中国家,则需考虑废弃电器电子产品非正规回收活动的存在,因此直接分析法难以奏效;而对于具有完善的废弃电器电子产品管理体系的发达国家,则可应用直接分析法进行估算。

2.2 产品类别

根据估算产品类别,开展废弃电器电子产品估算方法的进一步遴选。根据所选产品类别的市场饱和程度、寿命特征等分类标准,废弃电器电子产品可分为多种类型,基于此可以进一步对估算方法进行筛选。

基于市场饱和程度,电器电子产品可以分为市场饱和产品与市场不饱和产品。若产品类别市场饱和程度

与替换率较高,例如城市家庭中的洗衣机等大型家用电器,则可应用饱和市场模型;若市场饱和程度或替换率较低,例如农村家庭中的空调等产品,则饱和市场模型不再适用。

基于寿命特征,电器电子产品可分为硬件型、技术型与混合型。平均使用寿命可以视为寿命分布的一种简化形式。若估算对象为大型家用电器等硬件型产品,其寿命多因硬件损坏而结束且相对稳定,则可使用正态分布或者威布尔分布等方法计算产品寿命分布,进而优先选择市场供给 A 模型、斯坦福模型等方法;若产品寿命与技术革新密切相关,相对较短且不稳定(例如电脑、手机等消费电子产品),则时间梯度模型、MFA 模型等无需寿命分布的方法更为适用。

### 2.3 数据来源与质量

经过前两个步骤的筛选之后,可以根据数据的可获得性、来源与质量等因素最终选择适宜的估算方法。输入数据是估算废弃电器电子产品产生量的基础,其质量直接影响着估算结果的准确性和可靠性。例如,产品销售量是绝大多数废弃电器电子产品产生量估算方法所需的关键数据,一般有 2 种数据来源,其一为由当期产量、进出口量推算得到的表观销售量,其优势在于产量、进出口量等数据均为国家统计体系中的权威数据,不足则在于没有考虑当期未形成实际销售而暂存于各级销售商处的产品数量;其二则是通过市场调研等方式得到,多来源于行业协会或者专业市场调研公司,可以反映产品销售量的真实状况,但是一般持续性较差。在针对我国废弃手机产生量进行估算的三组已有研究中,就分别采用了三组各不相同的年度手机销售量数据,包括表观销售量<sup>[34]</sup>、《中国信息年鉴》中的销售量<sup>[15]</sup>以及源自第三方市场调研公司的销售量<sup>[25]</sup>。由于来源不同,三组销售量数据在某些年份差异明显,严重影响了估算结果的质量。

另外,一些已有研究使用的输入数据为转引自其他研究的“二次引用数据”,这就需要对转引数据的可靠性加以评估,以便将不确定性控制在合理范围内。

## 3 讨论

本文系统分析了国内外现有的 13 种废弃电器电子产品产生量估算方法,分别对其设计思路、估算公式与应用实例等方面进行了详述,特别在数据需求方面对 13 种方法进行了对比。基于上述分析提出了废弃电器电子产品产生量估算方法的选择策略,即综合考虑估算对象的系统边界、产品类别、数据来源与质量等特征,基于实际情况选择适宜的估算方法。

产生量是废弃电器电子产品管理的重要基础信息。目前国内外废弃电器电子产品产生量的数据主要通过估算获得,结果的可靠性有待提高。选择适宜的估算方法与提高数据质量是废弃电器电子产品产生量估算工作中需要解决的关键问题。围绕上述关键问题,近年来学术界进行了一些有益的探索:在估算方法选择方面,近年来国内外高水平估算实例多采用 MFA 模型,以期通过宏观的设计思路弥补微观数据精度的不足;在提高数据质量方面,近年来国内外学术界通过拓宽数据来源、应用数理模型与进行交叉检验等方法对输入数据进行修正,以期提高其精确性。上述探索都取得了较好的效果,预期在未来的一段时间内,这两方面仍将是废弃电器电子产品产生量估算领域研究的热点和重点,而数据需求较少的 MFA 模型则会获得更多的应用。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Li J H, Zeng X L, Stevels A L N. Ecodesign in consumer electronics: past, present and future. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2014, 45(8): 840-860.
- [ 2 ] Zhou L, Xu Z. Response to waste electrical and electronic equipments in China: legislation, recycling system, and advanced integrated process. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(9): 4713-4724.
- [ 3 ] Araújo M G, Magrini A, Mahler C F, Bilitewski B. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Waste Management*, 2012, 32(2): 335-342.
- [ 4 ] Oguchi M, Sakanakura H, Terazono A, Takigami H. Fate of metals contained in waste electrical and electronic equipment in a municipal waste treatment process. *Waste Management*, 2012, 32(1): 96-103.
- [ 5 ] Zeng X L, Song Q B, Li J H, Yuan W Y, Duan H B, Liu L L. Solving e-waste problem using an integrated mobile recycling plant. *Journal of*

- Cleaner Production, 2014, 90: 55-59.
- [ 6 ] Ongondo F O, Williams I D. Greening academia: use and disposal of mobile phones among university students. *Waste Management*, 2011, 31(7): 1617-1634.
- [ 7 ] Chung S S. Projection of waste quantities; the case of e-waste of the People's Republic of China. *Waste Management & Research*, 2011, 30(11): 1113-1129.
- [ 8 ] Wilkinson S, Duffy N, Crowe M. Waste from electrical and electronic equipment in Ireland; a status report. Wexford, Ireland: Clean Technology Center, Cork Institute of Technology, 2001.
- [ 9 ] Kumar P, Shrihari S. Estimation and material flow analysis of waste electrical and electronic equipment (WEEE) - a case study of Mangalore City, Arnatka, India. Chennai, India: Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, 2007: 148-154.
- [ 10 ] Eugster M, Hischer R, Duan H. Key environmental impacts of the Chinese EEE industry: an life cycle assessment study. St. Gallen, Switzerland and Beijing, China: EMPA and Tsinghua University, 2007.
- [ 11 ] Chancere P. Substance Flow Analysis of the Recycling of Small Waste Electrical and Electronic Equipment; an Assessment of the Recovery of Gold and Palladium[D]. Berlin: Institut für Technischen Umweltschutz, 2010.
- [ 12 ] Polák M, Drápalová L. Estimation of end of life mobile phones generation; the case study of the Czech Republic. *Waste Management*, 2012, 32(8): 1593-1591.
- [ 13 ] 代颖, 马祖军. 废旧家电回收处理体系及管理机制. 北京: 科学出版社, 2010.
- [ 14 ] Liu X B, Tanaka M, Matsui Y. Generation amount prediction and material flow analysis of electronic waste; a case study in Beijing, China. *Waste Management & Research*, 2006, 24(5): 434-445.
- [ 15 ] 高颖楠, 徐鹤, 卢现军. 基于市场供给 A 模型的手机废弃量预测研究 // 2010 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 北京: 中国环境科学学会, 2010: 3597-3601.
- [ 16 ] 刘小丽, 杨建新, 王如松. 中国主要电子废物产生量估算. *中国人口资源与环境*, 2005, 15(5): 113-117.
- [ 17 ] 林逢春, 王珏. 中国废旧电脑产生量预测及对策研究. *上海环境科学*, 2003, 22(7): 479-482.
- [ 18 ] Matthews H S, McMichael F C, Hendrickson C T, Hart D J. Disposition and End-of-Life Options for Personal Computers. Carnegie Mellon University, Green Design Initiative Technical Report No 97-10, 1997.
- [ 19 ] Dwivedy M, Mittal R K. Estimation of future outflows of e-waste in India. *Waste Management*, 2010, 30(3): 483-491.
- [ 20 ] Fishbein B K. Waste in the Wireless World: the Challenge of Cell Phones. New York: INFORM Inc, 2002.
- [ 21 ] Osibanjo O, Nnorom I C, Ogbonna K C. Modelling waste generation by the telecom sector in Nigeria: the grey side of the impressive outing. *Waste Management & Research*, 2008, 26(4): 317-326.
- [ 22 ] Robinson B H. E-waste: an assessment of global production and environmental impacts. *Science of Total Environment*, 2009, 408(2): 183-191.
- [ 23 ] Chung S S, Lau K Y, Zhang C. Generation of and control measures for, e-waste in Hong Kong. *Waste Management*, 2011, 31(3): 544-554.
- [ 24 ] United Nations Environmental Programme(UNEP). E-waste manual Volume II. Osaka/Shiga: United Nations Environmental Programme, 2007.
- [ 25 ] 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, 28(3): 124-126.
- [ 26 ] Yu J L, Williams E, Ju M T, Yang Y. Forecasting global generation of obsolete personal computers. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(9): 3232-3237.
- [ 27 ] Yang Y, Williams E. Logistic model-based forecast of sales and generation of obsolete computers in the U.S. *Technological Forecasting and Social Change*, 2009, 76(8): 1105-1114.
- [ 28 ] Zhang L, Yuan Z W, Bi J, Huang L. Estimating future generation of obsolete household appliances in China. *Waste Management & Research*, 2012, 30(11): 1160-1168.
- [ 29 ] Zhang L, Yuan Z W, Bi J. Predicting future quantities of obsolete household appliances in Nanjing by a stock-based model. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(11): 1087-1094.
- [ 30 ] Steubing B, Böni H, Schluep M, Silva U, Ludwig C. Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis. *Waste Management*, 2010, 30(3): 473-482.
- [ 31 ] Lin C H. A model using home appliance ownership data to evaluate recycling policy performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52(11): 1322-1328.
- [ 32 ] Kang H Y, Schoenung J M. Estimation of future outflows and infrastructure needed to recycle personal computer systems in California. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(2): 1165-1174.
- [ 33 ] Jang Y C, Kim M. Management of used & end-of-life mobile phones in Korea; a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 55(1): 11-19.
- [ 34 ] Yu J L, Williams E, Ju M T. Analysis of material and energy consumption of mobile phones in China. *Energy Policy*, 2010, 38(8): 4135-4141.



- [35] Industry Council for Electronic Equipment Recycling (ICER). UK status report on waste from electrical and electronic equipment. Industry Council for Electronic Equipment Recycling, 2000.
- [36] Crowe M, Elser A, Gopfert B, Mertins L, Meyer T, Schmid J, Spillner A, Strobel R. Waste from electrical and electronic equipment (WEEE)-quantities, dangerous substances and treatment methods. Copenhagen; European Environment Agency, 2003.
- [37] United Nations University. 2008 review of directive 2002/96 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Bonn, Germany; United Nations University, 2007.
- [38] Masui K. Calculation of amount of discarded end-of-life products by using multi-regression analysis // Eco Design 2005, Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Tokyo; IEEE, 2005; 624-625.
- [39] Dwivedy M, Mittal R K. Future trends in computer waste generation in India. Waste Management, 2010, 30(11): 2265-2277.
- [40] 吕彬. 中国电子废物生命周期管理方法研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2010.
- [41] Walk W. Forecasting quantities of disused household CRT appliances-a regional case study approach and its application to Baden-Wuerttemberg. Waste Management, 2009, 29(2): 945-951.
- [42] Fisher J C, Pry R H. A simple substitution model of technological change. Technological Forecasting and Social Change, 1971, 3: 75-88.
- [43] Norton J, Bass F. A diffusion theory model of adoption and substitution for successive generations of high-technology products. Management Science, 1987, 33(9): 1069-1086.
- [44] Walk W. Approaches to estimate future quantities of waste electrical and electronic equipment (WEEE). Berlin; Congress and Exhibition Electronics Goes Green 2004; Driving Forces for Future Electronics, 2004; 263-268.
- [45] Gutiérrez E, Adenso-Díaz B, Lozano S, González-Torre P. A competing risks approach for time estimation of household WEEE disposal. Waste Management, 2010, 30(8-9): 1643-1652.
- [46] Tonglet M, Phillips P, Read A D. Using the theory of planned behaviour to investigate the determinants of recycling behaviour: a case study from Brixworth, UK. Resources, Conservation and Recycling, 2004, 41(3): 191-214.
- [47] Saphores J D M, Nixon H, Ogunseitan O A, Shapiro A A. How much e-waste is there in US basements and attics? Results from a national survey. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11): 3322-3331.
- [48] Nordic Council of Ministers. Method to measure the amount of WEEE generated. Copenhagen; Nordic Council of Ministers, 2009.
- [49] Danish Environmental Protection Agency. A model for projection of ISAG Data, FRIDA. Danish Environmental Protection Agency, 2006.
- [50] Statistic Norway. Projection of organic waste 2001—2020. Statistic Norway, 2004.
- [51] Environment Bureau. Safe and sustainable: a new producer responsibility scheme for waste electrical and electronic equipment. Hong Kong; Environment Bureau of Hong Kong SAR Government, 2010.
- [52] Feszty K, Murchison C, Baird J, Jamnejad G. Assessment of the quantities of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Scotland. Waste Management & Research, 2003, 21(3): 207-217.