



## 典型电子废弃物中金属资源开采潜力分析

郭学益<sup>1</sup>, 严康<sup>1,2</sup>, 张婧熙<sup>1</sup>, 黄国勇<sup>1</sup>, 田庆华<sup>1</sup>

(1. 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083;

2. 江西理工大学 冶金与化学工程学院, 赣州 341000)

**摘要:** 采用 logistic 模型、群体平衡模型、物质流分析方法分别对我国 5 种电器电子产品的平均拥有量和总拥有量、电子废弃物及废旧线路板的产生量、金属资源存量及开采潜力进行研究。结果表明: 到 2030 年, 我国电视机、电脑和手机的拥有量将分别达到 776.49、463.65 和 1702.84 百万台。我国 5 种典型电子废弃物和废旧电路板总产生量将分别达到 280.73 和 29.92 万 t, 废旧电路板中金、银、铜、锡、铅和镉的存量将分别达到 119.5、305.7、60915、7897、5189 和 101.5 t。2015~2030 年, 我国典型电子废弃物及废旧电路板的产生量随着更新换代的速度加快、平均拥有量的增加、电器电子产品的使用寿命变短呈增长的趋势, 但增长率较前 15 年(2001~2015)将放缓。

**关键词:** 电子废弃物; 废旧线路板; 群体平衡模型; 物质流分析; 金属资源; 开采潜力预测

文章编号: 1004-0609(2018)-02-0365-12

中图分类号: TF0; X705

文献标志码: A

电子废弃物(Waste electrical and electronic equipment, WEEE)是指电器电子产品在生产过程中产生的废弃物以及经使用后废弃的电器电子产品<sup>[1]</sup>。包括家用电器(如电视机、冰箱、空调、洗衣机、电脑等)、通讯及办公设备(如手机、电话、传真机、打印机等)。随着电器电子产品的快速普及与消费, 电子信息技术的快速发展, 导致电器电子产品的更新换代速度不断加快, 产品的寿命不断缩短, 电子废弃物的产生量急剧增加<sup>[2]</sup>。电子废弃物已成为全球增长速度最快的固体废弃物之一<sup>[3]</sup>。电子废弃物中含有几十种可回收利用的有价金属, 同时, 电子元器件中含有毒有害物质, 若处理不当, 将会对环境造成严重污染。电子废弃物的高增长性、高价值性和高污染性已在全球范围内引起广泛关注<sup>[4]</sup>。

中国是一个资源使用大国, 但同时也是资源极其缺乏的国家。部分战略性金属资源(如铜、钴等)长期依赖进口。随着原生矿产资源的不断枯竭, 大部分的金属资源蕴含于产品, 已转移到城市之中, 形成“城市矿产”。电子废弃物是典型的“城市矿产”资源。对电子废弃物进行资源化利用可以有效缓解资源压力和降低资源的对外依存度, 还可以减轻环境压力。印刷电路板(Waste printed circuit board, WPCB)是电器电子

产品的重要组成部分, 是各种电子元器件的重要载体, 包含了所有的贵金属, 极具回收价值<sup>[5]</sup>。电子废弃物中二次金属资源主要赋存于废旧线路板<sup>[6]</sup>, 其资源化利用正成为一个全球性课题。

借鉴发达国家的废弃物回收利用的成功经验, 我国已加快推进城市矿产资源发展策略<sup>[7]</sup>。到 2015 年底, 已累计批复六批 49 个“城市矿产”示范基地, 废弃电器电子产品处理基金补贴名单的处理企业达到 109 家, 年处理能力已超过 1.5 亿台, 但实际废弃电器电子产品回收处理量仅 7500 万台<sup>[8]</sup>。产能过剩严重, 究其原因主要是电子废弃物的产生量和资源储量等基础信息缺失, 未能对未来资源开采潜力进行预测分析, 对其中蕴含的金属资源在多大程度上可替代原生资源等问题的认识不够清晰, 导致企业产业规模与实际资源供给不匹配, 资源配置不合理。要查明电子废弃物中金属资源储量, 必须掌握电子废弃物的产生量、未来发展趋势等基本信息。

同时, 由于未建立电器电子产品基础信息数据库, 电子废弃物产生量主要采用数学模型进行估算<sup>[9]</sup>。常用数学模型包括: 市场供给模型(Market supply model)、斯坦福模型(Stanford method)、卡内基梅隆模型(Carnegie Mellon method)、时间梯度模型(Time-step

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604306); 科技部国际合作项目(2014DFA90520); 江西理工大学博士启动基金资助项目(jxxjbs17046)

收稿日期: 2016-11-03; 修订日期: 2017-07-24

通信作者: 田庆华, 副教授, 博士; 电话: 0731-88877863; 传真: 0731-88836207; E-mail: qinghua@csu.edu.cn

method)、时间序列模型(Time-series method)、物质流分析模型(Substance flow analysis method)等<sup>[10]</sup>。国内外对于电子废弃物产生量估算已有少量的研究<sup>[11-14]</sup>。张伟等<sup>[15]</sup>采用斯坦福模型对我国主要电子废弃物产生量进行了预测及特征分析。LIU 等<sup>[16]</sup>采用物质流分析方法对北京市“四机一脑”产生量进行了预测,到2020年,废旧“四机一脑”产生量将达到282万台。高颖楠等<sup>[17]</sup>采用市场供给A模型估算了我国废弃手机的产生量。从目前国内的研究来看,电子废弃物的研究主要集中在国家层面或区域层面,对某一种或几种电子废弃物的产生量进行估算,主要侧重于电子废弃物的管理,并未关注其中的资源存量及未来发展趋势,相关研究报道甚少。

因此,本文作者采用群体平衡模型和物质流分析方法估算典型电子废弃物及其中废旧线路板产生量,查明其中金属资源存量,并预测2016~2030年我国5种典型废旧电器电子产品产生的废旧线路板中金属资源的开采潜力,为废旧线路板的资源化技术的开发及管理提供基础数据。

# 1 研究方法

## 1.1 研究范围

由于电子废弃物种类多,基于消费使用情况,电子产品的报废高峰期存在差异。根据《废弃电器电子产品处理目录》(2014年版)<sup>[18]</sup>,本研究选取已进入报废高峰期的典型的电器电子产品包括:CRT电视机、LCD电视机、台式电脑、笔记本电脑、手机。将电子废弃物中的废旧电路板作为金属资源开采潜力分析对象。金属开采潜力是指废旧线路板中可供回收利用的金属量。研究范围基于国家层面,估算2000~2030年

废旧线路板的产生量,并测算其中金属资源的存量和开采潜力。废旧线路板产生量及其金属资源存量物质流分析框架如图1所示。

## 1.2 计算方法

本研究采用威布尔分布对产品进行寿命分析,采用群体平衡模型对废旧电器电子产品产生量进行估算,将物质流分析方法用于废旧线路板的产生量、金属资源的存量及开采潜力的分析。

### 1.2.1 产品拥有量估算

根据“生长理论”,电子产品的社会拥有量遵循“S”型增长曲线规律,产品的平均拥有量变化将经历4个不同阶段:投入期、生长期、成熟期和衰退期<sup>[19]</sup>。本研究采用Logistic模型对平均拥有量进行预测,通过式(1)计算;产品总拥有量可通过式(3)计算:

$$\bar{P}_t = \bar{P}_{\max} / [1 - a \cdot \exp\{-b(t - t_0)\}] \tag{1}$$

$$a = -\exp\{b(t_{1/2} - t_0)\} \tag{2}$$

$$P_t = \bar{P}_t \times N_t \tag{3}$$

式中: $\bar{P}_t$ 为第t年每百户某产品拥有量; $\bar{P}_{\max}$ 为每百户某产品拥有量最大极限值; $t_0$ 为logistic曲线回归计算初始年; $t_{1/2}$ 为每百户某产品均拥有量达到最大极限值中间值时的年份; $b$ 为每百户某产品拥有量的增长率,通过对2000~2015年的数据拟合得到;参数a可以由式(2)计算; $N_t$ 为第t年我国居民户数; $P_t$ 为第t年某产品的总拥有量。其中手机的总拥有量以每百人拥有量计算。

### 1.2.2 产品寿命分布

产品寿命分布是研究电子废弃物产生量必不可少的参数<sup>[20]</sup>。产品寿命分析通常有两种处理方法<sup>[21]</sup>:一种是将产品的寿命设定为常数并假设平均寿命等于产

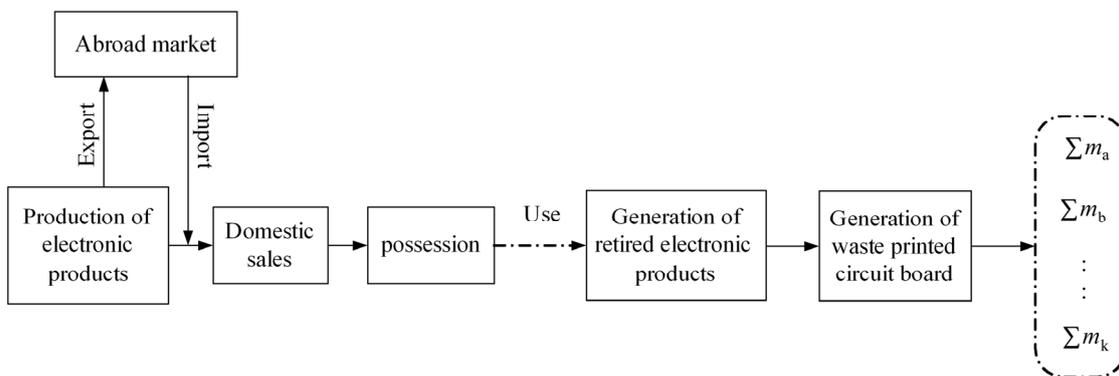


图1 废旧线路板产生量及其金属资源存量物质流分析框架

Fig. 1 Framework of substance flow analysis of generation quantities of WPCB and metal resources stock

品的使用寿命;另一种是将产品的寿命采用统计学方法进行寿命分布计算。常用的产品寿命概率统计分布包括:威布尔分布、对数分布、正态分布、 $\delta$ 分布<sup>[22]</sup>。其中威布尔分布是最广泛应用于电器电子产品的寿命分布分析<sup>[23]</sup>。本研究中的电器电子产品寿命分布采用威布尔分布进行分析,累积威布尔分布函数如式(4)所示:

$$F_t(y) = 1 - \exp \left[ - \left\{ \frac{y}{y_{av}} \right\}^\beta \cdot \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \right\}^\beta \right] \quad (4)$$

$$y_{av} = \alpha \cdot \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (5)$$

式中: $y$ 为某产品的寿命; $F_t(y)$ 为产品使用 $y$ 年后在第 $t$ 年累积废弃率,由公式(4)计算而得; $y_{av}$ 为产品的平均使用寿命,由公式(5)计算而得; $\beta$ 为威布尔分布的形状参数,可由产品的历年累积废弃率曲线拟合而得; $\Gamma$ 为伽马函数。

### 1.2.3 废弃物产生量计算

本研究采用群体平衡模型(Population balance model, PBM)对电子废弃物的产生量进行估算。该模型由日本学者TASAKI<sup>[24]</sup>设计,并广泛应用于电子废弃物的产生量的估算与预测。根据质量守恒定律,物质输入量等于输出量。典型电子废弃物产生量可由以下公式计算得到:

$$\hat{P}_t = S_t + \sum_i [S_{(t-i)} \cdot \{1 - F_t(i)\}] \quad (6)$$

$$f_t(i) = F_t(i) - F_t(i-1) \quad (7)$$

$$S_t = p_t - E_t + I_t \quad (8)$$

$$\hat{S}_t = P_t - P_{t-1} + G_t \quad (9)$$

$$G_t = \sum_{i=1} \{S_{(t-i)} \cdot f_t(i)\} \quad (10)$$

式中: $\hat{P}_t$ 为 $t$ 年预测某产品的社会拥有总量,可由式(6)计算而得; $f_t(i)$ 为在 $t$ 年产品寿命为 $i$ 年的废弃率,可由式(7)计算而得; $S_t$ 为某产品在 $t$ 年的国内销售量,可由式(8)计算而得,其中 $p_t$ 为 $t$ 年的国内某产品的销售量, $E_t$ 和 $I_t$ 分别为 $t$ 年某产品的进口量和出口量; $\hat{S}_t$ 为预测的销售量,可由式(9)计算而得; $G_t$ 为 $t$ 年的某废旧产品的产生量,根据销售量和废弃率,可由式(10)计算而得;预测的销售量可以通过产生量和拥有量进行循环代入计算得到。

### 1.2.4 废旧线路板产生量及其金属存量计算

电器电子产品在废弃前后质量基本保持不变,线路板在电子废弃物中占有一定的质量比。本研究采用

物质流分析方法对废旧线路板的产生量及其金属存量进行计算分析,可由以下公式计算得到:

$$W_{t,WPCB} = \sum_{i=1} \{S_{(t-i)} \cdot f_t(i) \cdot w \cdot C_{WPCB}\} \quad (11)$$

$$W_{t,TWPCB} = \sum_{j=1} W_{j,t,WPCB} \quad (12)$$

$$\sum m_{k(t)} = \sum_{j=1} W_{j,t,WPCB} \cdot x_{j,k} \quad (13)$$

式中: $W_{t,WPCB}$ 为某产品在 $t$ 年的废旧线路板产生量; $C_{WPCB}$ 为某产品中废旧线路板占废弃物产生量的质量分数; $W_{t,TWPCB}$ 为 $t$ 年各类产品废旧线路板产生量的总和; $w$ 为某产品的平均质量; $x_{j,k}$ 为金属 $k$ 在产品 $j$ 的线路板中所占的质量分数; $\sum m_{k(t)}$ 为 $t$ 年废旧线路板中金属 $k$ 的质量总和。

## 1.3 数据来源

为了对典型电子废弃物(电视机、电脑、手机),废旧线路板进行产生量及金属存量分析,采用数学模型进行估算,其中数学模型中各参数的求解需要大量的基础数据作为支撑。2000~2014年CRT电视机、LCD电视机、台式电脑、笔记本电脑、手机的生产、销售、进出口数据来源于对应年份第二年的中国电子信息产业统计年鉴<sup>[25-39]</sup>。CRT电视机、LCD电视机、台式电脑、笔记本电脑的生产、销售、进出口数据,分别如表1~4所列。实际上,山寨手机占据手机销售量的一定的份额<sup>[40]</sup>,这部分手机并未列入官方统计范畴,在对手机使用情况的调查问卷中也证实了这一点。因此,本研究将山寨手机的销售量考虑其中,山寨手机占手机销售量的10%,但由于2006~2011年为山寨手机的快速发展时期,根据曹希敬等<sup>[41]</sup>的研究,将2006~2011年山寨手机销售量占比调整为10.4%、19.6%、24.2%、24.8%、23.7%和15%,手机的总销售量为官方统计手机销售量与山寨手机销售量之和。2000~2014年我国手机的生产、销售、进出口、山寨手机所占比例及实际销售量,如表5所列。2000~2030年中国人口数量,如表6所列,其中2000~2014年中国人口数据来自于中国统计年鉴<sup>[42]</sup>,2015~2030年中国人口数据来源于孟令国等<sup>[43]</sup>的研究。各电器电子产品的平均质量和线路板所占质量分数数据来源于国内某电子废弃物拆解企业现场调研。典型电子废弃物的平均质量及线路板所占的质量分数,如表7所列。各电器电子产品中线路板中金属所占的质量分数数据来源于OGUCHI等<sup>[44]</sup>的研究,如表8所列。

表1 CRT电视机生产、销售、进出口情况(单位:万台)

Table 1 Production, sale, import and export quantities of CRT TV (Units: 10<sup>4</sup>)

Year	Production	Export	Import	Sales
2000	5496.70	1548.5	18.6	3966.80
2001	6053.80	1648.9	19.8	4424.70
2002	6347.40	1837.9	20.60	4530.10
2003	6548.90	2010.82	12.50	4550.58
2004	7211.80	2227.31	9.82	4994.31
2005	7668.00	2564.29	18.46	5122.17
2006	7232.96	2992.20	28.90	4269.66
2007	6604.64	2481.07	100.36	4223.93
2008	5675.83	2071.80	41.30	3645.33
2009	2916.06	1411.81	17.75	1522.00
2010	2511.69	1430.20	10.40	1091.89
2011	1515.23	1090.10	6.10	431.23
2012	845.74	622.00	4.60	228.34
2013	287.59	82.70	2.03	206.92
2014	105.19	52.40	0.6	53.39

表2 LCD电视机生产、销售、进出口情况(单位:万台)

Table 2 Production, sale, import and export quantities of LCD TV (Units: 10<sup>4</sup>)

Year	Production	Export	Import	Sales
2000	0.22	0.08	3.56	3.70
2001	0.95	0.24	10.25	10.96
2002	1.85	0.58	22.34	23.61
2003	31.40	7.82	58.40	81.98
2004	112.69	12.66	26.61	126.64
2005	529.71	251.64	7.07	285.14
2006	1062.54	540.69	7.70	529.55
2007	1866.85	810.52	11.17	1067.50
2008	3293.36	1863.30	22.10	1452.16
2009	6956.36	4027.28	7.41	2936.49
2010	9151.64	5195.30	2.30	3958.64
2011	10713.08	5442.40	2.10	5272.78
2012	11632.24	5522.50	3.40	6113.14
2013	12488.48	5469.90	4.50	7023.08
2014	14023.67	6895.40	6.10	7134.37

表3 台式电脑生产、销售、进出口情况(单位:万台)

Table 3 Production, sale, import and export quantities of desktop PC (Units: 10<sup>4</sup>)

Year	Production	Export	Import	Sales
2000	711.79	146.8535	2.69	567.63
2001	751.93	130.9091	2.98	624.00
2002	1463.27	222.91	3.35	1243.71
2003	1883.04	377.89	1.9	1507.05
2004	1762.40	492.36	2.07	1272.11
2005	3518.84	623.25	2.39	2897.98
2006	3424.57	815.3	2.3	2611.57
2007	3401.95	874.68	2.64	2529.91
2008	2807.90	768.2	5.2	2044.90
2009	3193.95	699.52	9.79	2504.22
2010	5008.02	1046.3	27.6	3989.32
2011	7974.82	974.3	39.5	7040.02
2012	6226.31	903.9	31.6	5354.01
2013	5603.10	1006.6	36.8	4633.30
2014	865.83	274.03	22.9	614.70

表4 笔记本电脑生产、销售、进出口情况(单位:万台)

Table 4 Production, sale, import and export quantities of notebook PC (Units: 10<sup>4</sup>)

Year	Production	Export	Import	Sales
2000	7.90	0.29	48.37	55.98
2001	28.25	5.0881	52.57	75.73
2002	117.00	32.96	60.11	144.15
2003	1387.42	1329.57	66	123.85
2004	2750.00	2532.24	85.71	303.47
2005	4564.99	3374.42	72.99	1263.56
2006	5911.87	4818.11	72.2	1165.96
2007	8671.43	7302.63	56.7	1425.50
2008	10858.70	9882.72	63.2	1039.18
2009	15009.47	12492.17	59.9	2577.20
2010	18584.12	13808.45	122.6	4898.27
2011	23897.38	16970.86	148.9	7075.42
2012	25289.36	20951.79	234.2	4571.77
2013	17444.31	14712.33	367.7	3099.68
2014	22728.81	14921.3	100.6	7908.11

表5 手机生产、销售、进出口情况(单位: 百万台)

Table 5 Production, sale, import and export quantities of mobile phones (Units: 10<sup>6</sup>)

Year	Production	Export	Import	Sales	Shanzhai phones proportion/%	Shanzhai phones sales	Total sales
2000	38.52	9.51	6	35.01	10	3.50	38.51
2001	83.97	39.68	7.5	51.79	10	5.18	56.97
2002	120	41.09	17.2	96.11	10	9.61	105.72
2003	186.44	89.38	22.07	119.13	10	11.91	131.04
2004	233.45	146.05	12.72	100.12	10	10.01	110.13
2005	303.54	162.76	12.75	153.53	10	15.35	168.88
2006	480.14	385.72	28.92	123.34	10.40	12.83	136.17
2007	548.59	361.28	16.83	204.14	19.60	40.01	244.15
2008	559.64	314.29	17.72	263.07	24.20	63.66	326.73
2009	619.24	378.26	24.47	265.45	24.80	65.83	331.28
2010	998.27	497.93	18.65	518.99	23.70	123.00	641.99
2011	1132.58	507.81	9.25	634.02	15	95.10	729.12
2012	1181.54	496.23	9.59	694.9	10	69.49	764.39
2013	1455.61	729.12	8	734.49	10	73.45	807.94
2014	1627.2	880.12	10.12	757.2	10	75.72	832.92

表6 2000-2030年中国人口发展趋势(单位: 万人)

Table 6 Growing trend of population of China from 2000 to 2030 (Units: 10<sup>4</sup>)

Year	Total population	Year	Total population	Year	Total population
2000	126743	2011	134735	2022	140970
2001	127627	2012	135404	2023	141300
2002	128453	2013	136072	2024	141560
2003	129227	2014	136762	2025	141760
2004	129968	2015	136930	2026	141960
2005	130756	2016	137750	2027	142090
2006	131448	2017	138490	2028	142160
2007	132129	2018	139130	2029	142160
2008	132602	2019	139670	2030	142100
2009	133450	2020	140120		
2010	134091	2021	140580		

表7 典型电子废弃物的平均质量及线路板所占的质量分数

Table 7 Average mass of typical electronic waste and mass percentage of PCB

Electronic product type	Average mass/kg	Mass fraction of PCB/%
CRT TV	14.56	5.80
LCD TV	16.80	9.80
Desktop PC	12.60	9.00
Notebook PC	2.46	13.00
Mobile phone	0.125	30.30

表 8 各种废旧线路板中金属含量

Table 8 Metal content of types of WPCB

Electronic product type	Metal content of WPCB/(mg·kg <sup>-1</sup> )													
	Common metal						Precious metal			Less common metal				
	Al	Cu	Zn	Sn	Pb	Fe	Ag	Au	Pd	Ba	Bi	Co	Ga	Sr
CRT TV	62000	72000	5300	18000	14000	34000	120	5	20	2400	280	36	-	550
LCD TV	63000	180000	20000	29000	17000	49000	600	200	-	3000	-	-	-	300
Desktop PC	18000	200000	2700	18000	23000	13000	570	240	150	1900	50	48	11	380
Notebook PC	18000	190000	16000	16000	9800	37000	1,100	630	200	5600	120	80	10	380
Mobile phone	15000	330000	5000	35000	13000	18000	3,800	1,500	300	19000	440	280	140	430

## 2 结果与讨论

### 2.1 各类电器电子产品社会拥有量预测

采用 Logistic 模型对电视机、电脑、手机的平均拥有量进行预测。结合发达国家日本电子电器产品消费水平<sup>[23]</sup>和我国电子电器产品发展情况调查,将城镇、农村居民每百户拥有彩色电视机的极大值分别设定为 250 台、180 台,将城镇、农村居民每百户拥有电脑的极大值分别设定为 120 台、80 台。城镇、农村居民每百户平均拥有彩色电视机和电脑台数预测结果如图 2 与图 3 所示。将每百人拥有手机的极大值设定为 121 台,每百人手机平均拥有量预测结果如图 4 所示。结果显示,3 种类型的电器电子产品的平均拥有量呈持续增长趋势,但未来 15 年(2016~2030 年)的平均增长率较前 15 年(2001~2015 年)将放缓。

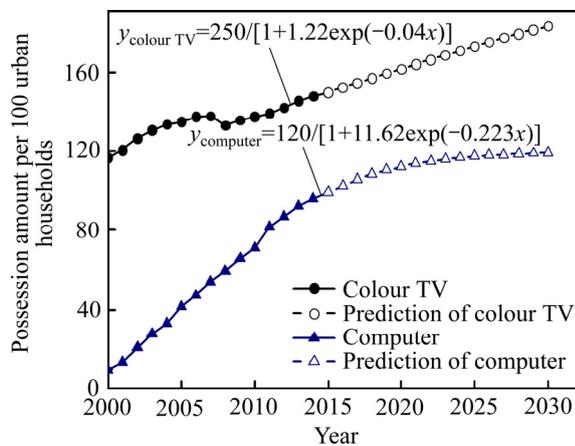


图 2 城镇居民每百户平均拥有彩色电视机、电脑台数预测  
Fig. 2 Prediction of average possession amounts of color TV and computer per 100 urban households

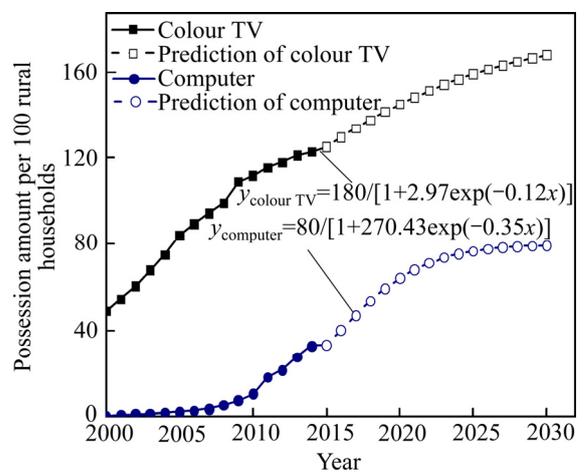


图 3 农村居民每百户平均拥有彩色电视机、电脑台数预测  
Fig. 3 Prediction of average possession amounts of colour TV and computer per 100 rural households

根据中国的人口发展水平情况,结合电器电子产品的平均拥有量,3 种电器电子产品的社会拥有量预测结果如图 5 所示。结果显示,2015 年我国电视机、电脑和手机的社会拥有量分别为 605.93、321.19 和 1307.68 百万台。由于电子信息技术的快速发展,我国电视机、电脑、手机的社会拥有量在未来 15 年还将保持持续增长,到 2030 年,我国电视机、电脑和手机的社会拥有量将分别达到 776.49、463.65 和 1702.84 百万台。

### 2.2 典型电子废弃物产生量估算

#### 2.2.1 电器电子产品的寿命分布

本研究采用问卷调查的方式对 5 种电器电子产品的使用寿命展开调查,5 种废旧电器电子产品的寿命分布情况如图 6 所示,采用累积威布尔分布对寿命进行拟合求解得到电子产品的寿命分布参数,结果如表 9 所列。结果显示,我国 CRT 电视机、LCD 电视机、

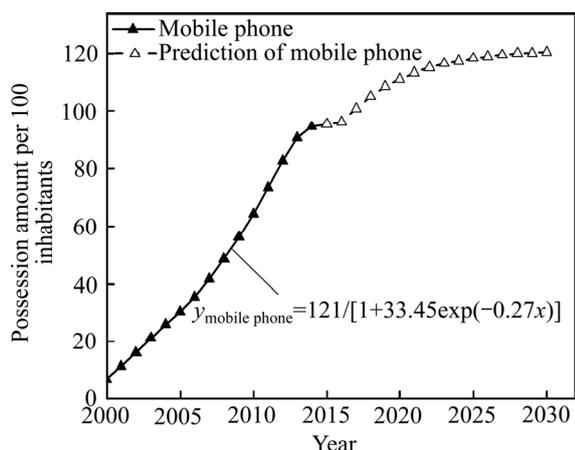


图 4 每百个居民手机平均拥有台数预测  
 Fig. 4 Prediction of average possession amounts of mobile phone per 100 inhabitants

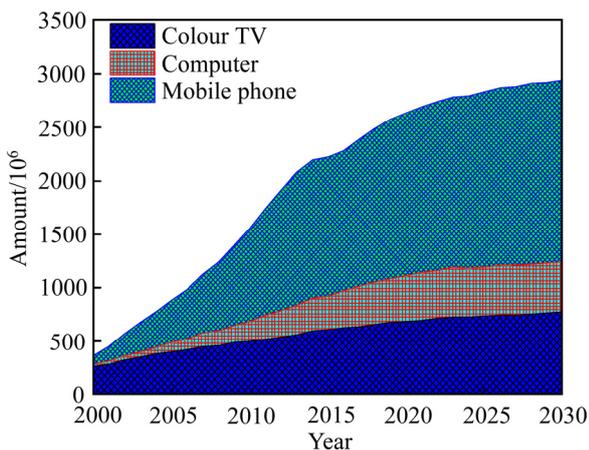


图 5 三类电器电子产品社会拥有量预测  
 Fig. 5 Prediction of total possession amounts of three types of electrical electronic products

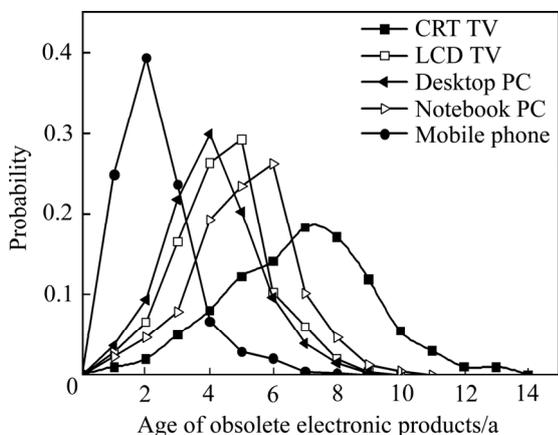


图 6 5 种电器电子产品的寿命分布  
 Fig. 6 Lifespan distribution of five types of electrical electronic products

表 9 产品寿命分布参数估算及相关系数( $R^2$ )结果

Table 9 Estimated lifespan distribution parameters and coefficient of determination ( $R^2$ )

Product	$b$	$y_{av}$	$R^2$
CRT TV	3.17	6.36	0.999
LCD TV	3.12	4.00	0.996
Desktop PC	3.56	2.81	0.999
Notebook PC	4.64	3.40	0.998
Mobile phone	1.76	1.73	0.995

台式电脑、笔记本电脑和手机的平均使用寿命分别为 6.36、4.52、3.56、4.64 和 1.74 年。各电子产品寿命的拟合相关性良好。LI 等<sup>[9]</sup>2012 年采用问卷数据调查的方式获取基础数据, 并估算我国手机的平均使用寿命为 1.9 年, 本研究对手机的使用寿命估算结果与之相契合, 证实电子产品的使用寿命在逐渐缩短。

### 2.2.2 产生量估算

本研究基于群体平衡模型对 2000~2030 年我国废旧 CRT 电视机、LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑、手机的产生量进行估算。首先对 5 种电器电子产品的销售量进行预测, 结果如图 7 所示。由图 7 可以看出, 未来 15 年内, 我国 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑、手机的销售量还将呈缓慢增长趋势。随着液晶显示技术的发展, 液晶电视机逐步取代了 CRT 电视机, 导致 CRT 电视机的销售量在 2016 年逐渐减少至 0, 并随着 CRT 电视机的淘汰, 液晶电视机的销售量呈快速增长趋势。到 2030 年, 我国 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机的销售量将分别达到 112.82、59.79、65.21 和 978.25 百万台。

5 种废旧电器电子产品的产生量估算结果如图 8 所示。由图 8 可以看出, 2015 年我国废旧 CRT 电视机、LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机分别为 28.12、46.26、48.94、40.52 和 781.07 百万台。预计到 2030 年, 将分别达到 0、106.41、58.66、64.62 和 972.13 百万台。除 CRT 电视机外, 其他 4 种电器电子产品的废弃量呈持续增长趋势, LCD 电视机的增长率明显高于其他 3 种电器电子产品。由于电子信息技术的不断发展, 电器电子产品的更新速度不断加快, 产品的使用寿命逐年降低, 导致废旧电器电子产品的产生量逐年增加。

### 2.3 废旧线路板产生量估算

采用物质流分析方法对 5 种废旧电器电子产品中的废旧线路板产生量进行估算, 结果如图 9 所示。由图 9 可以看出, 2015 年, 废旧 CRT 电视机、LCD 电

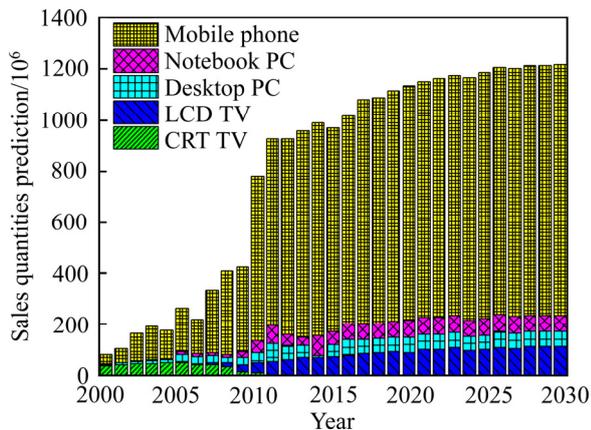


图7 5种电器电子产品销售量预测

Fig. 7 Sales quantities prediction of five types of electrical electronic products

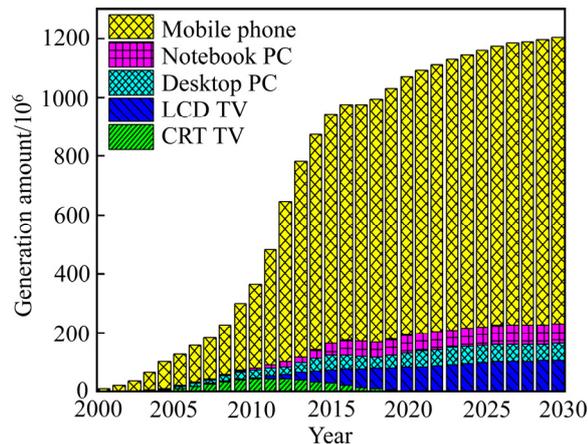


图8 5种废旧电器电子产品的产生量

Fig. 8 Generation amount of five types of obsolete electrical electronic products

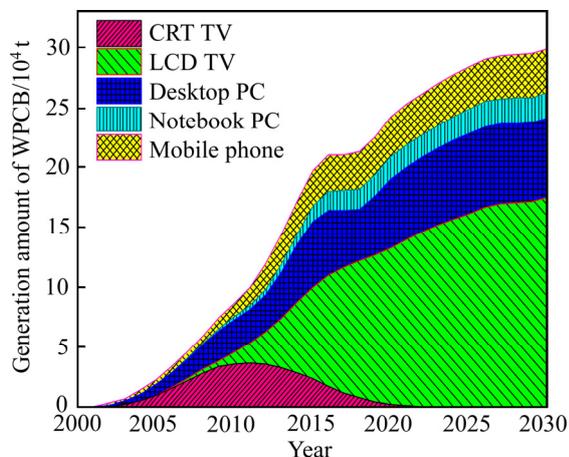


图9 5种废旧电器电子产品中的废旧线路板产生量

Fig. 9 Generation amount of WPCB from five types of obsolete electrical electronic products

视机、台式电脑、笔记本电脑和手机中废旧线路板的产生量分别为 23743、76154、55493、12959 和 29583 t, 废旧线路板的总产生量为 197933 t。废旧线路板的产生量在未来 15 年还将呈稳定的增长趋势,并趋于稳定。由于 CRT 电视机到 2017 年将完全被 LCD 电视机取代,到 2030 年,将不再产生废旧 CRT 电视机,那么废旧 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机中废旧线路板的产生量将分别达到 175196、66517、20665 和 36819 t,废旧线路板的总产生量将达到 29.92 万 t。废旧 LCD 电视机中废旧线路板的产生量远远高于其他 3 种废旧电器电子产品。

## 2.4 废旧线路板中金属资源存量及开采潜力

本研究采用物质流分析方法对废旧线路板中的金属资源存量及开采潜力进行分析研究。废旧线路板中的金属可分为:普通金属、贵金属、稀散金属,包括金、银、铜、锡等,不同电器电子产品中线路板所占的质量分数不同,线路板中所含的有价金属量存在差异。不同品牌,不同年代生产的电器电子产品线路板中金属含量同样存在差异。由于数据原因,采用电器电子产品线路板中常见金属组分对废旧线路板中金属存量进行计算分析。

考察了 5 种废旧电器电子产品中金、银、铜、锡、铅、锑的存量,分析结果如图 10 所示。由图 10 可以看出,废旧手机线路板中的贵金属金、银存量高,废旧 LCD 线路板中的铜、锡存量高。2015 年,废旧 CRT 电视机、LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机中金存量分别为 0.119、15.23、13.32、8.16 和 44.37 t。5 种废旧电器电子产品废旧线路板中金总存量为 81.21 t。到 2030 年,除 CRT 电视机外,废旧 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机含金量将分别达到 35.04、15.96、13.02 和 55.23 t,金的总存量为 119.5 t。随着报废量的增加,各废旧电器电子产品中的含金量在未来 15 年将呈稳定的增长趋势。

到 2030 年,废旧 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机中银存量将分别达到 105.12、37.91、22.73 和 139.91 t; 故银的总存量为 305.7 t。废旧 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机中铜存量将分别达到 31535、13303、3926 和 12150 t; 故铜的总存量为 60915 t。废旧 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机中锡存量将分别达到 5080、1197、331 和 1289 t; 故锡的总存量为 7897 t。废旧 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机中铅存量将分别达到 2978、1530、202 和 479 t; 故铅的总存量为 5189 t。废旧 LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机中锑

存量将分别达到 52.56、25.28、7.85 和 15.83 t; 故铈的总存量为 101.5 t。废旧手机中的银存量最大, 明显高于其他 3 种废旧产品。废旧 LCD 电视机中铜、锡、铅、铈的存量最大。

由 5 种典型电子废弃物中的废旧线路板中金属存量的发展趋势可知, 5 种废旧线路板中贵金属金、银

资源开采潜力大小依次为: 手机、LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑、CRT 电视机; 铜资源开采潜力大小依次为: LCD 电视机、台式电脑、手机、台式电脑、CRT 电视机; 锡资源开采潜力大小依次为: LCD 电视机、手机、台式电脑、笔记本电脑、CRT 电视机。铅、铈资源开采潜力大小依次为: LCD 电视机、台式电脑、

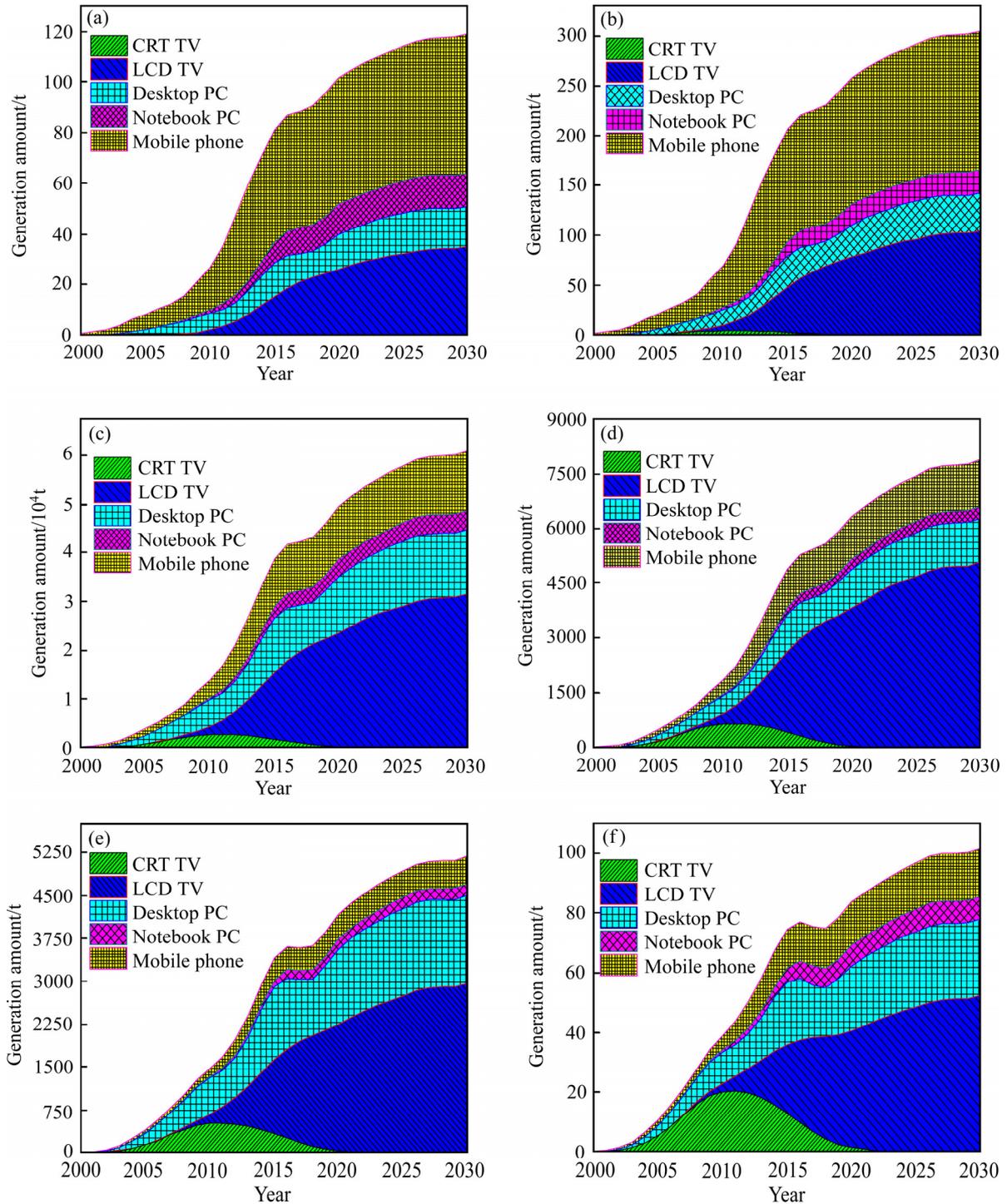


图 10 5 种废旧电器电子产品的废旧线路板中金属产生量

Fig. 10 Generation amount of metals in WPCB from five types of obsolete electrical electronic products: (a) Au; (b) Ag; (c) Cu; (d) Sn; (e) Pb; (f) Sr

手机、笔记本电脑、CRT 电视机。由于信息技术的不断发展,生产者为了节约生产成本,已逐渐降低贵金属在元器件中的使用量<sup>[45]</sup>,将导致废旧线路板中的贵金属存量计算在一定范围内存在的波动。

### 3 结论

1) 采用 logistic 模型对我国电视机、电脑、手机的社会拥有量进行了预测分析。三类电器电子产品的社会拥有量在未来 15 年还将保持缓慢的增长。到 2030 年,我国电视机、电脑和手机的社会拥有量将分别达到 776.49、463.65 和 1702.84 百万台。

2) 采用群体平衡模型对我国废旧 CRT 电视机、LCD 电视机、台式电脑、笔记本电脑和手机的产生量及废旧线路板的产生量进行估算分析。到 2030 年,5 种废旧电器电子产品产生量将分别达到 0、106.41、58.66、64.62 和 972.13 百万台,废旧线路板的总产生量将达到 29.92 万 t。

3) 采用物质流分析方法对典型电子废弃物中的金属存量及开采潜力进行分析研究。预测未来 15 年 5 种废旧电器电子产品中废旧线路板中金属存量的增长趋势,到 2030 年,废旧线路板中金、银、铜、锡、铅和镉的存量分别为 119.5、305.7、60915、7897、5189 和 101.5 t。

### REFERENCES

- [1] 郭学益,田庆华. 有色金属资源循环理论与方法[M]. 长沙:中南大学出版社,2008.  
GUO Xue-yi, TIAN Qing-hua. The resource recycling of nonferrous metal fundamental and approach[M]. Changsha: Central South University Press, 2008.
- [2] 郭学益,江晓健,刘静欣,刘 旸,刘子康. 梯级碱溶分步提取废弃电路板中有价金属[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(2): 406-413.  
GUO Xue-yi, JIANG Xiao-jian, LIU Jing-xin, LIU Yang, LIU Zi-kang. Recovery of metal values from waste printed circuit board using a cascading alkali leaching process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(2): 406-413.
- [3] DWIVEDY M, MITTAL R K. Estimation of future outflows of e-waste in India[J]. Waste Management, 2010, 30: 483-491.
- [4] DWIVEDY M, MITTAL R K. An investigation into e-waste flows in India[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 37: 229-242.
- [5] 刘静欣,郭学益,刘 旸. 废弃电路板多金属粉末碱性熔炼产物分形浸出动力学[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 545-552.  
LIU Jing-xin, GUO Xue-yi, LIU Yang. Fractal leaching kinetics of alkaline smelting product with metal enrichment from waste printed circuit boards[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 545-552.
- [6] 郭学益,刘静欣,田庆华. 废弃电路板多金属粉末低温碱性熔炼过程的元素行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1757-1763.  
GUO Xue-yi, LIU Jing-xin, TIAN Qing-hua. Element behavior of low temperature alkaline melting process of waste printed circuit boards[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1757-1763.
- [7] 李金惠,宋庆彬. 中国城市矿产开发潜力、问题及对策研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(12): 96-99.  
LI Jin-hui, SONG Qing-bin. Study on the developing status, problems and suggestions of urban mining in China[J]. Environmental Pollution and Control, 2014, 36(12): 96-99.
- [8] 中华人民共和国商务部. 中国再生资源回收行业发展报告(2016)[EB/OL]. <http://www.ezaisheng.com/news/show-46649.html>. 2016-05-25.  
Ministry of Commerce of the People's Republic of China. China's development report of renewable resources recovery industry (2016)[EB/OL]. <http://www.ezaisheng.com/news/show-46649.html> 2015-05-25.
- [9] LI Bo, YANG Jian-xin, LÜ Bing, SONG Xiao-long. Estimation of retired mobile phones generation in China: A comparative study on methodology[J]. Waste Management, 2015, 35: 247-254.
- [10] 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[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 1-9.  
LI Bo, YANG Jian-xin, LÜ Bing, SONG Xiao-long. Generation estimation of waste electrical and electronic equipment: methods review and selection strategy[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 1-9.
- [11] ARAUJO M G, MAGRINI A, MAHLER C F, BILITEWSKI B. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil[J]. Waste Management, 2012, 32: 335-342.
- [12] RAHMANI M, NABIZADEH R, YAGHMAEIAN K, MAHVI A H, YUNESIAN M. Estimation of waste from computers and mobile phones in Iran[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 87: 21-29.
- [13] HABUER, NAKATANI J, MORIGUCHI Y. Time-series product and substance flow analyses of end-of-life electrical and electronic equipment in China[J]. Waste Management, 2014, 34: 489-497.
- [14] 阮久莉,郭玉文,刘景洋,乔 琦. 我国打印机报废量预测研究[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(5): 32-35.  
RUAN Jiu-li, GUO Yu-wen, LIU Jing-yang, QIAO Qi. Forecast of scrapped printers in provincial level in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2013, 31(5): 32-35.
- [15] 张 伟,蒋洪强,王金南. 我国主要电子废弃物产生量预测及特征分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 195-199.  
ZHANG Wei, JIANG Hong-qiang, LU Ya-ling, WANG Jin-nan. Amount of electronic waste generated in China: Prediction and

- characteristics analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(6): 195–199.
- [16] LIU Xian-bin, TANAKA M, MATSUI Y. Generation amount prediction and material flow analysis of electronic waste: A case study in Beijing, China[J]. *Waste Management Research*, 2006, 24: 434–445.
- [17] 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[C]// 中国环境科学学会 2010 年学术年会论文集, 上海: 中国环境科学学会, 2010: 3597–3601.
- GAO Ying-nan, XU He, LU Xian-jun. Estimation of waste mobile phones with market supply a method[C]// *Proceedings of 2010 Academic Annual Conference of China Society Environmental Science*. Shanghai: China Society Environmental Science, 2010: 3597–3601.
- [18] 中华人民共和国工业和信息化部. 废弃电器电子产品处理目录(2014 年版)[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057542/n3057544/c3649950/part/3649951.pdf>, 2015–02–09.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Waste electrical product processing directory (2014)[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057542/n3057544/c3649950/part/3649951.pdf>, 2015–02–09.
- [19] KIM S, OGUCHI M, YOSHIDA A, TERAZONO A. Estimating the amount of WEEE generated in South Korea by using the population balance model[J]. *Waste Management*, 2013, 33: 474–483.
- [20] MURAKAMI S, OGUCHI M, TASAKI T, DAIGO I, HASHIMOTO S. Lifespan of commodities, Part I The creation of a database and its review[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 4: 598–612.
- [21] OGUCHI M, MURAKAMI S, TASAKI T, DAIGO I, HASHIMOTO S. Lifespan of commodities, part II methodologies for estimating lifespan distribution of commodities[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14(4): 613–626.
- [22] YAN Ling-yu, WANG An-jian, CHEN Qi-shen, LI Jian-wu. Dynamic material flow analysis of zinc resources in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 75: 23–31.
- [23] OGUCHI M, KAMEYA T, YAGI S, URANO K. Product flow analysis of various consumer durables in Japan[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52: 463–480.
- [24] TASAKI T, TAKASUGA T, OSAKO M, SAKAI S. Substance flow analysis of brominated flame retardants and related compounds in waste TV sets in Japan[J]. *Waste Management*, 2004, 24: 571–580.
- [25] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.
- [26] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [27] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [28] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [29] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [30] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [31] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [32] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [33] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [34] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [35] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [36] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). *Electronic information industry statistics yearbook of China*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [37] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT).

- Electronic information industry statistics yearbook of China[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [38] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). Electronic information industry statistics yearbook of China[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [39] 工业和信息化部运行监测协调局. 中国电子信息产业统计年鉴[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.  
Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). Electronic information industry statistics yearbook of China[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [40] GUO Xue-yi, YAN Kang. Estimation of obsolete cellular phones generation: A case study of China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 321–329.
- [41] 曹希敬, 胡维佳. 中国山寨手机的演进及启示[J]. 科技和产业, 2014, 14(3): 35–39.  
CAO Xi-jing, Hu Wei-jia. Preliminary research on the developing approach of China's shanzhai mobile phone. Science Technology and Industry 2014; 14(3): 35-39.
- [42] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.  
Chinese National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [43] 孟令国, 李超令, 胡广. 基于PDE模型的中国人口结构预测研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(2): 132–141.  
MENG Ling-guo, LI Chao-ling, Hu Guang. Prediction of China's population structure based on the PDF model[J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(2): 132–141.
- [44] OGUCHI M, MURAKAMI S, SAKANAKURA H, KIDA A, KAMEYA T. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources[J]. Waste Management, 2011, 31: 2150–2160.
- [45] VATS M C, SINGH S K. Assessment of gold and silver in assorted mobile phone printed circuit boards (PCBs): Original article[J]. Waste Manage 2015; 45: 280–288.

## Exploitation potentiality analysis of metal resources in typical electronic waste

GUO Xue-yi<sup>1</sup>, YAN Kang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jing-xi<sup>1</sup>, HUANG Guo-yong<sup>1</sup>, TIAN Qing-hua<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Metallurgy and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** The average and total possession amounts of typical electrical electronic products were estimated using the logistic model. The generation amount of typical electronic waste and waste printed circuit board (WPCB) were estimated using the population balance model (PBM). Stock of metal resources in WPCB and exploitation potentiality prediction were analyzed with substance flow analysis (SFA). The results indicate that the total possession amount of television, computer and mobile phone are going to reach to 776.49 million, 463.65 million, 1702.84 million, respectively, in 2030. Generation amount of the five typical electronic waste and WPCB are going to reach to  $280.73 \times 10^4$  and  $29.92 \times 10^4$  t, respectively, in 2030. The stock quantities of gold, silver, copper, tin, lead and strontium contain in WPCB will reach to 119.5, 305.7, 60915, 7897, 5189 and 101.5 t, respectively, in 2030. In the period from 2015 to 2030, the generation amount of typical electronic waste and WPCB are growing with constantly updating function, design of electronic products and gradual shortening of service lifespan. But the growing speed will slow down, compared with the past 15 years (2001–2015).

**Key words:** electronic waste; waste printed circuit board; population balance model; substance flow analysis; metal resources; exploitation potentiality prediction

**Foundation item:** Project(51604306) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2014DFA90520) supported by the National Science and Technology Cooperation of China; Project(jxxjbs17046) supported by Doctoral Program of Jiangxi University of Science and Technology, China

**Received date:** 2016-11-03; **Accepted date:** 2017-07-24

**Corresponding author:** TIAN Qing-hua; Tel: +86-731-88877863; E-mail: qinghua@csu.edu.cn

(编辑 王超)