

引用格式: 李历铨, 李伯含, 陈从喜. 区域层面电子废弃物远景资源化潜力预测: 以北京为例[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 567-576. [Li L Q, Li B H, Chen C X. Forecasting prospective potential of the secondary resources in electronic waste at the regional level: Evidence from Beijing[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 567-576.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.13

区域层面电子废弃物远景资源化潜力预测 ——以北京为例

李历铨¹, 李伯含², 陈从喜³

(1. 国家信息中心, 北京 100045; 2. 中国铝业集团有限公司, 北京 100082;

3. 自然资源部信息中心, 北京 100036)

摘要: 电子废弃物回收利用具有区域性和长期性双重特征, 区域层面电子废弃物远景资源化潜力分析可为国家循环产业布局及企业产能调整提供数据支撑。本文构建了区域层面电子废弃物远景资源化潜力预测模型(LRP模型), 并引入Weibull分布模型对调研获得的产品寿命分布数据进行修正, 引入Logistic分布模型对LRP模型的时间维度进行拓展。以北京市五大家电为例, 整合家庭及办公场所两个电子废弃物重要产生源, 依托500户居民的网络调研数据, 预测了至2050年北京市电子废弃物的资源化潜力, 并对其影响因素及影响效果进行了系统的探讨。结果表明: ①北京市电子产品报废量在2020年之前呈快速增长的趋势, 年均增长率超10%, 而之后年份变动幅度较小, 总量均维持在1000万台以上。②电子废弃物资源潜力自2018年基本趋于稳定, 年产生量超过26.5万t, 其中金属含量较多, 占资源总量的54%以上。③分析了人口增长趋势、寿命分布、逆向物流、边界设定4类情景对电子废弃物资源化潜力的影响效果, 其中人口增长速度提升以及产品寿命缩短情景对电子废弃物总体的资源化潜力具有较大影响, 分别会使2020—2050年间的蓄积资源化潜力提升41.87万t及133.11万t, 边界设定情景则会大幅增加废旧电脑的资源化潜力, 而逆向物流情景的影响则相对较小。建议加快运用数字化手段提升电子废弃物的溯源能力, 加强电子产品全生命周期的统筹管理水平, 促进高更新换代产品逆向物流及商业模式的配套衔接。

关键词: 区域; 电子废弃物; 远景潜力; 再生资源; 北京市

DOI: 10.18402/resci.2021.03.13

1 引言

电子产品与生产生活密切相关, 随着居民收入水平的提高, 对电子产品的需求逐渐趋向个性化与多样化, 电子产品的种类日益增加^[1], 更新换代速度明显加快^[2], 对资源的消耗显著增加^[3]。电子产品报废过程并不影响蕴含的资源种类及数量, 若能得到合理利用无疑会成为破解中国资源约束的有效手段^[4,5]。然而, 目前中国电子废弃物资源化潜力数据缺失, 难以有效支撑政府收运体系规划与回收利用产业布局等基础工作的开展, 直接导致电子废弃物回收利用出现了严重的原料短缺现象, 制约该产

业的进一步发展。

2020年5月, 国家发展改革委等七部委联合下发《关于完善废旧家电回收处理体系推动家电更新消费的实施方案》, 明确提出“各地方、各部门要进一步提高对完善废旧家电回收处理体系、促进家电消费更新重要意义的认识……加强数据统计监测和信息报送”。党的十九届五中全会决议指出“加快构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局”, 电子废弃物中富含铜、锡等中国短缺资源, 其资源化利用质量和水平是战略资源保障的重要手段, 直接影响中国未来发展格局^[6,7]。

收稿日期: 2020-07-14; 修订日期: 2021-02-20

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2019M660590)。

作者简介: 李历铨, 男, 北京人, 助理研究员, 研究方向为资源循环评价。E-mail: liliquan@sic.gov.cn

通讯作者: 李伯含, 男, 安徽人, 研究员, 研究方向为资源环境管理。E-mail: bh_li@mail.chalco.com.cn

电子废弃物资源潜力的分析已引起了国内外学者的广泛关注。Wang等^[8]、Kosai等^[9]、Islam等^[10]、Zeng等^[11]分别研究了美国、越南、澳大利亚及中国的电子废弃物产生量;郭学益等^[12]研究了中国典型电子废弃物中金属资源开发利用的潜力;王方等^[13]考虑了电子废弃物产生的季节性特征,构建了电子废弃物回收规模分解集成预测模型框架;雪晶等^[14]构建了汽车动态代谢预测模型,分析了中国废旧汽车的资源潜力;李博等^[15]比对了现有电子废弃物产生量估算模型的优势和不足。国内外研究成果普遍应用的方法是基于产品销售量及产品寿命分布2类数据估算废旧产品的短期资源潜力。然而,中国区域层面的产品产量或销售量数据并未细分为产品是否在本地区利用,尤其对于北京等特大城市来讲,众多电子产品远销外地,但也计入了区域年度产量或销售量,直接影响了电子废弃物资源潜力预测的准确性^[16]。与此同时,现有的研究方法大多适配短期电子废弃物产生量的核算,而电子废弃物回收利用网点的建设以及企业产能的调整均是一个长期的过程,短期数据难以适应该产业的发展需求。因此,亟需构建中国区域层面电子废弃物远景资源化潜力分析模型,为中国废旧物资循环利用体系构建提供数据支撑。

本文基于电子产品存量、使用寿命、资源含量及电子废弃物物流流向比例4类数据,构建区域层面电子废弃物远景资源化潜力预测模型。以北京市电视、台式电脑、冰箱、空调、洗衣机5类典型电子产品为例,整合家庭及办公场所2个重要的废弃物产生源,预测2020年至2050年该区域电子废弃物资源化潜力,进而分析其影响因素及影响效果。

2 区域层面电子废弃物远景资源化潜力预测模型(LRP)

2.1 LRP模型构建

按照质量守恒定律,物质的存量、流量相互影响,如存量增加意味着系统流入超过流出^[17]。由此,图1给出了可预测区域维度电子废弃物资源潜力的LRP(区域层面电子废弃物远景资源化潜力预测模型)构建思路。流入与流出量差额与存量变动关系如式(1)所示:

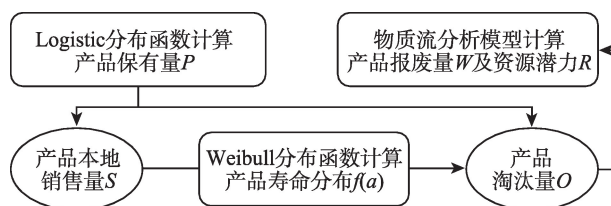


图1 区域层面电子废弃物远景资源化潜力预测模型

Figure 1 Long-term resource prediction model for forecasting prospective potential of the secondary resources in electronic waste at the regional level

$$S_t - O_t = P_t - P_{t-1} \quad (1)$$

式中: P 为电子产品社会存量; S 为其销售量即区域流入量; O 为产品淘汰量即区域流出量; t 为产品报废年份。

利用电子产品社会存量及使用寿命分布推导出各年份电子产品淘汰量如式(2)所示:

$$O_t = \sum_{i=1}^t S_{t-i} g(i) \quad (2)$$

式中: $g(i)$ 为产品在使用 i 年报废的比例

根据淘汰产品的逆向物流情况及电子废弃物中各类资源含量预测其资源潜力如式(3)所示:

$$R_{t,j} = \sum_{i=1}^t O_{t-i} \eta_{t-i} C_j \quad (3)$$

式中: $R_{t,j}$ 为第 t 年第 j 种资源的潜力; η_{t-i} 为考虑闲置及再利用时间后第 $t-i$ 年产生的产品淘汰量中在第 t 年拆解利用的数量

2.2 其他辅助模型支撑

2.2.1 Logistic分布模型:电子产品长期存量

为了获取电子废弃物远景资源化潜力,需要以电子产品长期社会存量数据作为支撑。按照电子产品的发展趋势,其人均存量综合表现为成长、拐点和饱和3种状态,即保持“S”形的增长趋势并于远景无限接近一个固定的最大值,服从于Logistic分布^[18,19]。因此,本文将该模型引入至LRP模型,估算电子产品长期人均存量数据,如式(4)所示:

$$dp/dt = rp(1 - p/K) \quad (4)$$

式中: p 代表了电子产品人均存量; r 代表内在增长率,即单位时间内电子产品人均存量的增长比例; K 代表人均存量的最大值。

该微分方程的解如式(5)所示:

$$p_u = K/[1 + \exp(-ru + C)] \quad (5)$$

2021年3月

式中: $C = \ln[p_0/(K - p_0)]$; p_0 代表初始年份的人均存量; u 代表选定年份距初始年份的时间差。

虽然原则上 K 值可以通过时间序列拟合确定,但是当已有数据仅覆盖该模型成长期时,为了确保计算准确需人为设定^[18]。本文通过设定 K 值的最大与最小值分别核算未饱和电子产品的人均存量。

从 1980—2018 年北京市电子产品存量数据可以看出,电视、冰箱、空调和洗衣机 4 类传统电子产品的家庭人均存量已不再增长,接近饱和状态,而电脑的存量相较发达国家仍有较大增长空间,本文结合中国的基本情况,将最大边界(PC-UB)设定为每一位 20~70 岁的居民均拥有一台满足个人需求的电脑,并且每一位在职员工均具有一台工作用电脑。而最小边界(PC-LB)则设定为 20~70 岁人群中只有 3/4 较为富有的居民才会拥有一台电脑,并且办公场所中 30% 的第一产业员工、60% 的第二产业员工以及 90% 的第三产业员工拥有电脑。进而通过上述 K 值及年度人均存量,即可利用 Logistic 模型拟合计算家庭和办公场所的长期人均存量。

2.2.2 Weibull 分布模型:电子产品服务寿命分布

在上述 LRP 模型中,各类产品的寿命分布虽均可通过调研数据获得,但由于样本数量有限难以涵盖全部消费者,为了准确测算产品的寿命分布,本文将寿命分布模型引入至 LRP 模型。在 Murakami 等^[20]的文献中总结了多种不同的产品寿命概念解释方法,由于本文调研的主体为电子产品消费者,其只能了解淘汰的电子产品在自家使用和闲置的时间,但并不清楚二手交易后产品的使用时长,因此本文将其定义为服务寿命,指的是从“产品消费至其为第一个使用者淘汰”的时间段,在这个过程后电子产品有可能闲置、二手使用或成为电子废弃物进入拆解企业。

由于电子产品的理论寿命取决于其中多种核心组件的疲劳程度,Weibull 分布可有效描述组件疲劳程度与产品使用寿命之间的关系^[21]。本文选取了 Weibull 分布修正调研数据,其概率密度函数如公式(6)所示:

$$f(t; u, v) = \begin{cases} \frac{u}{v} \left(\frac{t - t_0}{v} \right)^{v-1} \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{v} \right)^u \right] & t \geq t_0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: t_0 代表其初始年份; u 为尺度参数; v 为形状参数。利用最大似然估计的方法即可求算 u 、 v 两变量,进而可推算从销售年起经过 i 年淘汰的比例,即寿命 $g(i)$ 。

2.3 数据来源

北京市电子产品的存量数据源于 1981—2018 年《北京市统计年鉴》。为了获取北京市电子产品的寿命分布及电子废弃物的逆向物流情况,2019 年 12 月至 2020 年 1 月间作者通过问卷星平台对 581 户北京当地居民通过进行了网络调研,整理审查后获得有效问卷 500 份,有效率为 86.1%。调研结果显示:约有 44% 的淘汰电子产品在淘汰当年即被拆解企业处置利用,其余 56% 的淘汰电子产品被闲置或进入二手市场再利用,闲置及再利用时间取自文献[16]。常住人口及从业人员数量均来自于北京市统计年鉴,其长期数量变化假定与中国人口总体变化趋势保持一致,中国人口数量变化数据来源于联合国人口统计数据库^[23]。典型电子废弃物的单位重量取自 3 篇相关研究成果的平均值^[22,24,25],各类资源的重量比例及各类金属的重量比例分别取自文献[26]和[27]。

3 结果与分析

根据已构建的 LRP 模型以及相应的数据来源,可推算电子废弃物报废量及其远景资源化潜力。为了更好地分析模型中各参量变动的影响效果,本文首先基于联合国人口统计数据库的中国人口平均变动趋势、调研获取的产品寿命分布和逆向物流情况、以及电脑人均存量最大值的设定构建了基准情景,预测电子废弃物远景资源化潜力;随后围绕上述各参量构建了多种变化情景,分析了政策选择对电子废弃物远景资源化潜力的影响效果。

3.1 基准情景下模拟结果分析

3.1.1 电子产品存量及寿命分布

利用 Logistic 分布模型计算的电视、电脑、冰箱、空调、洗衣机人均存量的 R^2 值分别达到了 0.949、0.940、0.917、0.974、0.918,拟合优度达到较高水平。

从家庭部门 5 类家电人均存量角度分析(图 2a),各类家电的家庭人均存量均呈现了多个发展阶段。对于电视、冰箱、洗衣机 3 类家电,在 2008 年前均呈现了较快的发展速度,但随着家庭存量逐渐达

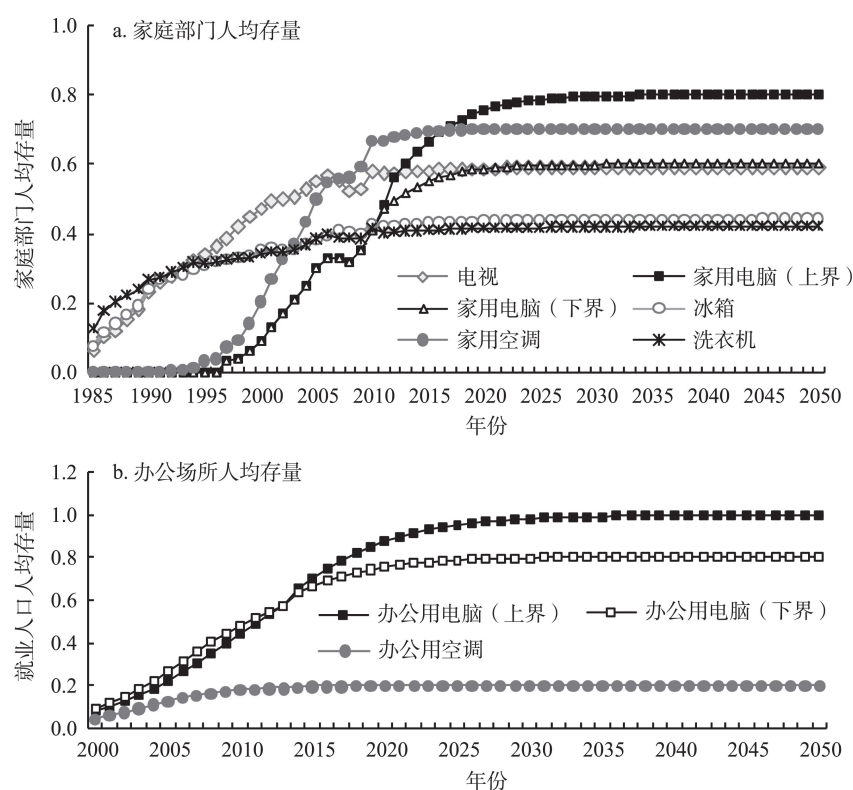


图2 北京市家庭部门及办公场所电子产品人均存量

Figure 2 Penetration rates of household and office electronic products in Beijing

到饱和状态,后续呈现了较为平稳状态,其中电视约维持在0.55台/人、冰箱约为0.41台/人,洗衣机约为0.40台/人。对于电脑和空调2类家电,在1997年前几乎未进入家庭日常使用,但自1997年起随着消费者对于生活品质的追求快速提升,上述2类家电均进入到了高速增长阶段,如1998—2008年间电脑和空调的人均增长率分别为23.36%及19.76%;自2017年开始,空调逐渐达到饱和状态,约维持在0.70台/人;而电脑至目前为止仍有较大增长空间,在PC-LB与PC-UB两种情况中,分别将于2024年及2028年达到饱和状态,约维持在0.60台/人及0.80台/人。

对于家庭部门中所有类型的家电,2008—2009年间家庭存量数值有较大的变化,分析其主要原因为:2008年的全球经济危机导致国内需求疲软,而自2009年始,中国政府为了对抗全球金融危机导致的电子产品外贸需求急速衰退,采取了“家电下乡”政策及“家电以旧换新”政策扩大内需,五大家电陆续成为补贴的对象,导致人均存量显著增长,仅

2010年家庭部门5类主要电子产品的平均增长率就达到9.4%。

从办公场所的电子产品人均存量角度分析(图2b),各类家电的增长趋势均与家庭部门具有一定的相似度,但达到饱和状态的时间具有较大差异,如空调于2014年趋于稳定状态,约维持在0.20台/人;由于办公场所对于电脑应用的刚性需求,其增长比例相较家庭场所更大,在PC-LB与PC-UB两种情况中,分别将于2031年及2036年趋于饱和状态,人均存量将维持在0.80台/人及1.00台/人。

北京市电子产品寿命分布如图3所示,其中电脑由于更新换代速度较快,其平均使用寿命相较其他家电更小,仅为5.2年,其中2年至7年的产品寿命比分别为1:5:18:34:32:10,使用5年及6年报废的数量最多。其余家电呈现了相似的寿命分布特征,平均寿命接近8年,如电视平均寿命为8.1年、冰箱为8.5年、空调为7.8年、洗衣机为8.0年。其中,电视使用8年及9年报废的数量最多,分别占到32%及33%;冰箱使用8年及9年报废的数量最多,分别

2021年3月

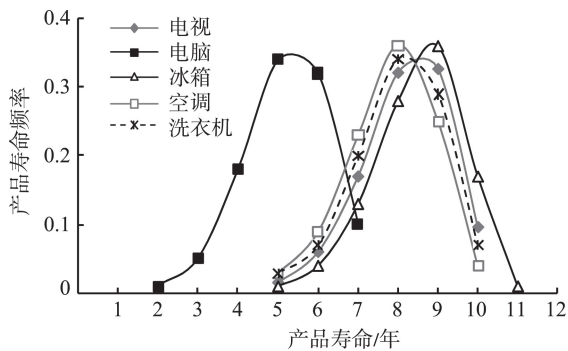


图3 北京市典型电子产品寿命分布

Figure 3 Lifespan distributions of typical electronic products in Beijing

占到28%及36%;空调使用7年至9年的数量最多,分别占到23%、36%及25%;洗衣机使用7年至9年的数量最多,分别占到20%、34%及29%。

3.1.2 电子废弃物报废量

利用LRP模型测算的电子产品报废量如图4a所示,从总量来看,2020年之前呈快速增长的趋势,年均增长率超10%,而之后年份变动幅度较小,总量均维持在1000万台以上,这说明北京市电子废弃物拆解处理设施应在2020年加快部署,而在后续年份中应基本保持原拆解能力运行。至2050年,电视

的年报废量将达到127.7万台、电脑491.2万台、电冰箱99.6万台、空调199.7万台、洗衣机101.4万台。

从分量来看,可以分为报废电脑、空调以及报废电视、冰箱、洗衣机2大组别,每一组别均呈现了相似的增长趋势。报废电脑数量的增长最为迅速,2000年仅为1.6万台,至2020年达到438.8万台,20年间的平均增长率达到32.4%;后续增长速度逐渐放缓,年增长率将降低至4%以下,至2033年电脑达到报废量最大值536.0万台,2033年之后受人口下降的影响,电脑报废量呈现小幅下降趋势,年下降趋势小于1%。报废空调增长速度整体也达到了较快的水平,2000年仅为1.7万台,至2020年达到219.4万台,年均增长率达到27.4%,预计至2021年将达到报废量最大值226.6万台;但与电脑不同的是,后续年份中报废空调数量呈现了小幅波动的趋势,如2022及2023年将分别下降3.2%及5.1%,但2024—2028年又分别上升了1.1%、3.5%、2.4%及0.7%,至2050年仍将保持该类波动趋势。

对于报废电视、冰箱、洗衣机3类电子产品,由于大多仅在家庭部门使用,且在2000年已达到了较大的报废基数,分别为41.4万台、37.3万台及40.7万

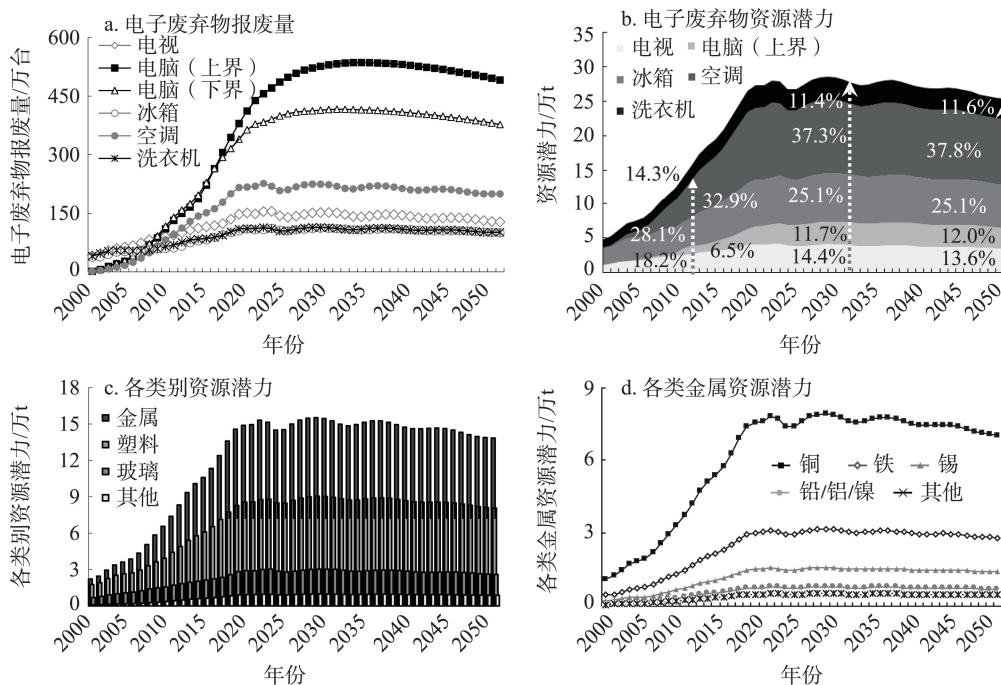


图4 2000—2050年北京市电子废弃物中各类资源潜力现状及预测图

Figure 4 Prospective potential of the secondary resources in electronic waste in Beijing, 2000-2050

台,因此其后续增长相对缓慢。电视于2020年达到148.5万台,年均增长率仅为4.9%,预计至2022年达到最大值155.0万台;冰箱于2020年达到107.6万台,年均增长率仅为3.2%,预计至2028年达到最大值111.7万台;洗衣机于2020年达到110.6万台,年均增长率仅为2.7%,预计至2028年达到最大值113.7万台。3类电子产品达到最大值后均与空调趋势一致,呈现了小幅波动下降趋势,这可能是由于电子产品的户均保有量逐渐达到饱和状态,但之前销售的该类电子产品尚未达到报废周期,无需新产品予以替代,又进一步限制了新产品在后续年份中的报废趋势,如此往复造成波动。

3.1.3 电子废弃物远景资源化潜力

电子废弃物资源总潜力如图4b所示,受电子产品报废量变化趋势的影响,2018年前,电子废弃物资源化潜力增长较快,电视、电脑、冰箱、空调、洗衣机的资源潜力已分别从2005年的1.81万t、0.12万t、3.27万t、1.18万t及1.56万t增长至2018年的3.99万t、2.36万t、6.71万t、10.36万t及3.18万t。自2018年电子废弃物中资源潜力已趋于稳定并有小幅下降,总量资源潜力均维持在25万t以上。2050年,各类电子产品的资源潜力分别为电视3.45万t、电脑3.05万t、电冰箱6.37万t、空调9.59万t、洗衣机2.94万t。从各类电子废弃物资源化潜力的占比角度分析,电视、电脑、冰箱、空调、洗衣机在2010年占比为18.2%、6.5%、28.1%、32.9%及14.3%;但到2030年电视、冰箱及洗衣机的比例逐渐下降,而电脑及空调的比例则有所上升,预计5类家电的占比将分别变更为14.4%、11.7%、25.1%、37.3%及11.4%;在后续年份中5类家电已达到了饱和状态,各类电子产品的资源化潜力占比变动较小,基本保持稳定状态,至2050年,预计5类家电的占比将分别变更为13.6%、12.0%、25.1%、37.8%及11.6%。

电子废弃物中各类资源潜力如图4c所示,增长趋势与资源总潜力保持一致,随着时间增长均呈现先增长后平稳波动的态势。其中,金属资源潜力最大,由2000年的2.2万t增长至2020年的14.9万t,年均增长率达到9.1%,随后金属量将维持在15万t左右,金属占比将维持在电子废弃物资源总量的54%以上。塑料资源潜力次多,已由2000年的1.8万t增

长至2020年的8.6万t,后续将维持在8.5万t以上,占比将保持在电子废弃物资源总量的31%以上。玻璃及其他资源的潜力已分别由2000年的0.69万t及0.1万t,增长至2020年的2.91万t及0.94万t,并在后续年份呈现小幅波动趋势。

电子废弃物中各类金属资源潜力如图4d所示,铜、铁、锡是资源潜力最高的3类金属,随后是铅、铝、镍及其他金属资源。其中,铜的比例最高,占金属总量的50%以上;铜资源已从2000年的1.1万t增长至2020年的7.6万t,在后续年份中增长放缓,维持在7万t以上,并与当年销售电子产品中含铜量呈现相似的趋势,这说明电子废弃物中的铜资源回收将大幅提升中国铜资源的保障能力。从2000年至2020年间,铁及锡资源将分别从0.5万t及0.2万t增长至3.0万t及1.5万t,均将有较大幅度的增长。

3.2 情景变化下电子废弃物远景资源化潜力预测

3.2.1 人口增长趋势的影响

联合国人口统计数据库中给出了中国人口的3种变化趋势,其中高速情景代表了中国全面放开二胎等政策影响下人口快速增长的情景,低速情景则代表了中国人口自发降速增长的情景,基准情景则代表了两者的均值。本文分别将上述3种情况代入LRP模型,其模拟结果如图5a所示,自2025年起3条曲线的走势逐渐分离,至2050年高速情景与低速情景中电子废弃物资源潜力的差距将达到6.03万t。在中国全面放开二胎政策等影响下,电子产品的产销量将有较大提升,这将进一步加剧中国战略资源约束^[28]。与此同时,电子废弃物报废量也将大幅提升,有望成为缓解资源约束的重要手段,如高速情景相较低速情景将分别在2031年、2042年及2050年提升超过2万t、4万t及6万t的电子废弃物资源潜力,约为低速情景该3年总资源潜力的7.4%、15.4%及23.7%。人口增长趋势会对电子废弃物资源潜力具有重大影响,但由于中国多种人口变化趋势产生的综合效果难以有效判断,电子废弃物资源潜力可能会有较大波动。建议加快运用互联网/物联网等数字化手段,从销售端加强区域层面电子产品销售量数据的监测能力,从消费端构筑面向消费者的电子废弃物产生数量及流向统计方案,尽快提升电子废弃物的溯源水平,防止电子废弃物数量激

2021年3月

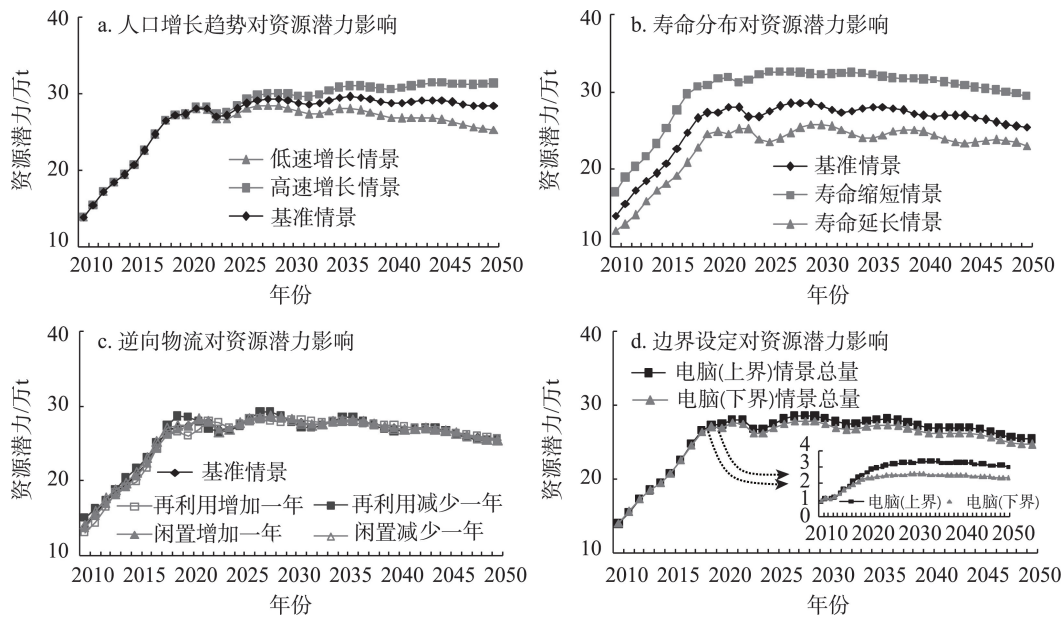


图5 2010—2050年电子废弃物资源化潜力的影响因素及影响效果

Figure 5 Influencing factors and their effects on the secondary resources potential, 2010-2050

增对现有回收利用体系的影响。

3.2.2 寿命分布的影响

基准场景测算过程中隐含了电子产品寿命分布不变的基本假设。然而,新型替代产品的快速研发会导致产品的寿命缩短,而生态设计及绿色消费模式的普及则会使得产品寿命延长,2种情况共同决定产品寿命分布的实际变化趋势。为此,本文设定了各类电子产品的寿命分布整体增加一年/减少一年作为寿命分布的上界/下界。如图5b所示,电子产品寿命分布对该模型的影响较大,寿命缩短与寿命延长场景的资源潜力差距长期维持在6万t以上。在实际情况中,产品生态设计和绿色消费将对电子产品的使用寿命产生较大影响,如欧盟在2020年启动的新一轮《循环经济行动计划》中明确提出“鼓励电子产品生产商通过提高产品的可重复使用性和可修复性来延长产品使用寿命”,从产品生命周期全链条视角全面提升电子产品生态设计及绿色消费能力^[29,30]。中国自“十二五”以来,通过《工业绿色发展规划(2016—2020年)》《绿色制造工程实施指南(2016—2020年)》等文件的引导,工业产品生态设计及绿色消费相关政策体系建设深入推进,已在冶金、机电、建材等多个领域初步形成了政府引导与市场推动相结合的产品生态设计及绿色消

费推进机制,但相较欧盟仍有较大差距。亟需全面落实电子产品生产者责任延伸制度体系,尽快提升电子产品从设计制造到消费、维修、回收再利用全周期的统筹管理能力,加快探索产品以租代售、共享经济、模块生产等多种新兴手段,从政策措施、管理模式及市场手段等多角度协同提升产品使用寿命。

3.2.3 逆向物流的影响

闲置及再利用时间影响了电子废弃物的流向及其比例。为此,本文分别研究了闲置及再利用时间分别增加/减少一年对电子废弃物资源潜力的影响。如图5c所示,4条曲线与基准场景曲线基本重合,可见逆向物流对资源潜力的影响较小。这主要是由于逆向物流仅能影响已淘汰产品拆解利用的时间,由于北京市人居空间面积较小,而废旧5类家电占地面积较大,居家闲置时间本身较少,进入二手流转的速度已经较快,这进一步限制了逆向物流对废旧家电拆解利用数量的影响。然而,对于手机及平板电脑等占地空间较小且价值较高的电子产品,闲置时间较长且二手售卖渠道众多,逆向物流的影响较大^[31]。中国十九届五中全会决议中已明确指出加快构建废旧物资循环利用体系,对于家电等产品,该政策可引导电子废弃物进入规范的回收利

用渠道,在短期内可发挥较好的效果,但长期来看该类政策难以影响电子废弃物总产生量及拆解量变化趋势。

3.2.4 边界设定的影响

在基准情景的研究中已对废弃电脑 K 值的2种设定方案(PC-LB与PC-UB)进行了详细说明,本文进一步对2种方案的影响效果进行综合分析。如图5d所示, K 值设定对于废弃电脑的远景资源化潜力有较大影响,2020—2050年间PC-LB与PC-UB情景的累积资源潜力差额达21.3万t,约占PC-LB情景中累计资源潜力总额的27.6%。由此可见,中国各区域的经济水平及生活方式均有较大差异,亟需按照区域特征分别设定 K 值,避免偏差的产生;尤其是对于经济发展水平较低、电子产品人均存量均处于加速增长状态的区域而言,设定人均存量的最大值对于计算结果至关重要。在中国大力促进家电更新消费,推动形成强大国内市场的前提下,各类电子产品的 K 值可能会有进一步的提升。

4 结论

电子废弃物回收利用具有区域性和长期性双重特征,区域层面电子废弃物远景资源化潜力分析可为政府规划布局回收网点提供数据支撑,为企业产能调整提供科学依据。本文得到的主要结论如下:

(1)基于电子产品存量、使用寿命、资源含量及电子废弃物物流流向比例4类数据,构建了LRP模型测算区域层面电子废弃物资源化潜力。为了解决其中调研获得的产品使用寿命数据难以覆盖全体居民,以及LRP模型无法预测远景资源化潜力的问题,本文分别在该模型中引入Weibull分布模型对调研获得的产品寿命分布数据进行修正,引入Logistic分布模型对LRP模型的时间维度进行拓展,从而使得LRP模型可有效预测区域层面电子废弃物远景资源化潜力。

(2)以北京市5类家电为例,整合家庭部门及办公场所2个维度,预测了2020—2050年该区域电子废弃物的报废量及资源化潜力:至2050年,废弃电视、电脑、冰箱、空调、洗衣机资源潜力将分别达到3.45万t、3.05万t、6.37万t、9.59万t及2.94万t,其中金属资源潜力较多,约占资源总潜力的54%以上。

(3)分析了人口增长趋势、寿命分布、边界设定、逆向物流4类情景对电子废弃物资源化潜力的影响效果,其中前3类影响较大,而逆向物流影响相对较小。建议加快运用数字化手段提升电子废弃物的溯源能力,加强电子产品全生命周期的统筹管理水平,促进高更新换代产品逆向物流及商业模式的配套衔接。

参考文献(References):

- [1] Garrido H C, Ramirez F J, Olivares T, et al. The adoption of internet of things in a circular supply chain framework for the recovery of WEEE: The case of lithium-ion electric vehicle battery packs [J]. Waste Management, 2020, 103: 32-44.
- [2] Zuo L S, Wang C, Sun Q. Sustaining WEEE collection business in China: The case of online to offline (O2O) development strategies [J]. Waste Management, 2020, 101: 222-230.
- [3] Işıldar A, Hullebusch E D V, Lenz M, et al. Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 362: 467-481.
- [4] 顾一帆, 吴玉峰, 周广礼, 等. 跨维度资源循环制度设计理论及实证模拟[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 600-610. [Gu Y F, Wu Y F, Zhou G L, et al. Theoretical framework and empirical simulation of policy design on trans-dimensional resource recycling[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 600-610.]
- [5] 王昶, 宋慧玲, 左绿水, 等. 国家金属资源安全研究回顾与展望[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 805-817. [Wang C, Song H L, Zuo L S, et al. Review and prospects of national metal resource security [J]. Resources Science, 2017, 39(5): 805-817.]
- [6] 黄群慧, 张晓晶, 汤铎铎, 等. 全球经济大变局、中国潜在增长率与后疫情时期高质量发展[J]. 经济研究, 2020, 55(8): 4-23. [Huang Q H, Zhang X J, Tang D D, et al. The changing global economic landscape and China's potential growth rate and high-quality development in the post-epidemic era[J]. Economic Research Journal, 2020, 55(8): 4-23.]
- [7] 王一鸣. 百年大变局、高质量发展与构建新发展格局[J]. 管理世界, 2020, 36(12): 1-13. [Wang Y M. Changes unseen in a century, high-quality development, and the construction of a new development pattern[J]. Management World, 2020, 36(12): 1-13.]
- [8] Wang F, Yu L, Wu A. Forecasting the electronic waste quantity with a decomposition-ensemble approach[J]. Waste Management, 2021, 120: 828-838.
- [9] Kosai S, Kishita Y, Yamasue E. Estimation of the metal flow of WEEE in Vietnam considering lifespan transition[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.

2021年3月

- 2019.104621.
- [10] Islam M T, Huda N. E-waste in Australia: Generation estimation and untapped material recovery and revenue potential[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117787.
- [11] Zeng X L, Ali S, Tian J, et al. Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1544.
- [12] 郭学益, 严康, 张婧熙, 等. 典型电子废弃物中金属资源开采潜力分析[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(2): 365-376. [Guo X Y, Yan K, Zhang J X, et al. Exploitation potentiality analysis of metal resources in typical electronic waste[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(2): 365-376.]
- [13] 王方, 余乐安, 查锐. 季节性数据特征驱动的电子废弃物回收规模分解集成预测建模研究[J/OL]. (2021-02-04) [2021-02-20]. *中国管理科学*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.2171. [Wang F, Yu L A, Zha R. Research on decomposition-ensemble approach for predicting e-waste recovery scale driven by seasonal data characteristics[J/OL]. (2021-02-04) [2021-02-20]. *Chinese Journal of Management Science*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.2171.]
- [14] 雪晶, 胡山鹰, 杨倩. 中国废旧汽车再生资源潜力分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(2): 169-176. [Xue J, Hu S Y, Yang Q. Potentials of the renewable resource of scrapped cars in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(2): 169-176.]
- [15] 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[J]. *生态学报*, 2015, 35(24): 7965-7973. [Li B, Yang J X, Lv B, et al. Generation estimation of waste electrical and electronic equipment: Methods review and selection strategy [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 7965-7973.]
- [16] Gu Y F, Wu Y F, Xu M, et al. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling for a sustainable resource supply in the electronics industry in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127: 331-338.
- [17] 董雪松, 黄健柏, 钟美瑞, 等. 技术进步对关键金属矿产需求影响的研究综述[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1592-1603. [Dong X S, Huang J B, Zhong M R, et al. A review on the impact of technological progress on critical metal mineral demand[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1592-1603.]
- [18] Guo X Y, Zhang J X, Tian Q H. Modeling the potential impact of future lithium recycling on lithium demand in China: A dynamic SFA approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110461.
- [19] Zhang S H, Gu Y F, Tang A J, et al. Forecast of future yield for printed circuit board resin waste generated from major household electrical and electronic equipment in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124575.
- [20] Murakami S, Oguchi M, Tasaki T, et al. Lifespan of commodities, part I[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14(4): 598-612.
- [21] Zeng X L, Ali S H, Tian J, et al. Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy[J]. *Nature Communications*, 2020, DOI: 10.1038/s41467-020-15246-4.
- [22] Liu X B, 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(5): 434-445.
- [23] United Nations. *World Population Prospects: The 2012 Revision* [R]. New York: United Nations, 2014.
- [24] Yang J X, Lu B, Xu C. WEEE flow and mitigating measures in China[J]. *Waste Management*, 2008, 28(9): 1589-1597.
- [25] Chung S, Lau K, Zhang C. Generation of and control measures for e-waste in Hong Kong[J]. *Waste Management*, 2011, 31(3): 544-554.
- [26] 王琪, 王红梅. 电子废弃物处理处置风险与管理概论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. [Wang Q, Wang H M. *Introduction of E-waste Disposal Risk and Management*[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.]
- [27] Cui J R, Zhang L F. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 158(2): 228-256.
- [28] 江小涓, 孟丽君. 内循环为主、外循环赋能与更高水平双循环: 国际经验与中国实践[J]. *管理世界*, 2021, 37(1): 1-19. [Jiang X J, Meng L J. Mainly inner circulation, outer circulation empowerment and higher level double circulation: International experience and Chinese practice[J]. *Management World*, 2021, 37(1): 1-19.]
- [29] Peiró L T, Polverini D, Ardente F, et al. Advances towards circular economy policies in the EU: The new ecodesign regulation of enterprise servers[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104426.
- [30] Brambila S, Sakao T. Effective ecodesign implementation with the support of a lifecycle engineer[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123520.
- [31] Islam M T, Huda N. Reverse logistics and closed-loop supply chain of waste electrical and electronic equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 137: 48-75.

Forecasting prospective potential of the secondary resources in electronic waste at the regional level: Evidence from Beijing

LI Liquan¹, LI Bohan², CHEN Congxi³

(1. State Information Center, Beijing 100045, China; 2. Aluminum Corporation of China Limited, Beijing 100082, China;

3. Information Center of the Ministry of Natural Resources, Beijing 100036, China)

Abstract: Electronic waste recycling is characterized by long-lasting process at the regional level. Study on prospective potential of the secondary resources in electronic waste at the regional level is beneficial for governments to plan the recycling outlets and for enterprises to adjust their productivity. In this study, a long-term resource prediction (LRP) model was built to obtain the prospective potential of the secondary resources. The Weibull distribution model was introduced in the LRP model to correct the lifespan distribution of electronic products, and the Logistic distribution model was introduced to expand the time dimension of the LRP model. Subsequently, the typical electronic products in Beijing were investigated in a case study, and household and office electronic products were both considered. Five hundred random households were selected for an online survey in Beijing. The resource potential of electronic waste in Beijing was predicted from 2010 to 2050, and the influencing factors and their effects were discussed. The result shows that: (1) The average annual growth rate of the quantity of the electronic waste is over 10% before 2020. But after that year, low change rate will replace the previous trend, and the total amount of the electronic waste will maintain at more than 10 million units. (2) The resource potential of electronic waste will basically stabilize and the total amount of the resources will exceed 265000 metric tons from 2018. In particular, the metal content accounts for about 54% of the total resources. (3) The effects of population growth trend, life distribution, reverse logistics and boundary setting scenarios on the recycling potential of e-waste are analyzed. The scenarios of population growth rate and product life distribution have great impacts on the overall recycling potential of electronic waste, which will increase the accumulated recycling potential by 418700 metric tons and 1331100 metric tons respectively from 2020 to 2050, with boundary setting scenario will greatly increase the recycling potential of waste computers, while reverse logistics scenario has relatively small impact. We recommend to accelerate the use of digital means to improve the traceability of electronic wastes, strengthen the overall management level of the whole life cycle of electronic products, and match up the trend with reverse logistics and appropriate business models of fast upgrading products.

Key words: regional level; electronic waste; prospective potential; secondary resources; Beijing City