

引用格式:郭甲嘉,何宛谦,靳敏.废弃电器电子产品回收利用的环境效益及空间格局[J].资源科学,2021,43(3):626-636.[Guo J J, He W Q, Jin M. Environmental benefits of recycling waste electrical and electronic equipment and spatial distribution[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 626-636.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.18

废弃电器电子产品回收利用的环境效益及空间格局

郭甲嘉,何宛谦,靳敏

(中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要:明晰废弃电器电子产品(Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)回收处理的环境效益及其空间分布特征,可以促进回收处理体系的合理规划和布局。本文基于保有量系数法估算了充分规范回收处理和省际流动情景下2020年中国31个省份(不包括港澳台地区)WEEE回收处理量,测算了所产生的环境效益,并结合空间自相关方法分析了环境效益的空间分布特征。结果表明:①2020年WEEE回收处理实现节约原材料和能源7621.5万t、减少污染物排放18978.9万t、减少温室气体排放232.7万t;②WEEE回收处理的环境效益在空间上呈现“东强西弱”的总体格局;③WEEE回收处理的环境效益存在全局空间正相关,局部空间关联特征表现为“东部沿海高-高集聚”、“北部省份低-低集聚”、福建省和江西省低-高异常、四川省高-低异常的特征。④WEEE回收处理环境效益前5位中的广东、浙江和河南并未形成高-高集聚的空间特征。据此,提出完善正规高效的WEEE回收处理体系、从区域空间尺度对WEEE回收处理设施及能力进行布局、提高具有明显集聚优势省份的WEEE回收处理设施利用率、充分发挥环境效益较高省份带动辐射作用的政策建议。

关键词:废弃电器电子产品;回收处理;环境效益;保有量系数法;空间自相关;空间分布;集聚

DOI: 10.18402/resci.2021.03.18

1 引言

中国已成为电器电子产品的生产大国、消费大国和废弃大国。废弃电器电子产品(Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)是典型的“城市矿产”资源,含有金、银、铜、锡等多种可回收利用的有色金属;同时,电子元器件中含有的铅、汞、镉、多溴联苯等有毒有害物质若处理不当,将会造成严重的环境污染,威胁人体健康^[1,2]。2011年开始实施的《废弃电器电子产品回收处理管理条例》,初步建立了WEEE回收处理的目录制度、WEEE回收处理企业的资质要求和处理基金制度等相关制度体系,推动了WEEE的规范回收处理(规范回收处理指WEEE进入具有资质的规范处理渠道)^[3]。近年来,随着中国生态文明和绿色发展的不断推进,《再生资源回收体系建设中长期规划(2015—2020)年》

《生产者责任延伸制度推行方案》《工业绿色发展规划(2016—2020年)》《循环发展引领行动》等一系列政策文件都对加强WEEE回收处理,促进资源循环利用提出了更高的目标。特别是党的十九大以来,加快推动绿色低碳发展、持续改善环境质量、全面提高资源利用效率成为中国社会经济绿色转型发展的核心。《推动重点消费品更新升级畅通资源循环利用实施方案(2019—2020年)》《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》等文件陆续颁布,进一步强调WEEE规范回收处理,对实现资源循环利用并降低环境污染的重要意义。

目前,中国WEEE回收处理设施的规划是以省级行政区划为基础展开的,没有充分考虑WEEE存在的省际流动、区域回收处理能力差异等要素^[4],导

收稿日期:2020-09-29 修订日期:2021-03-13

基金项目:中国人民大学科学研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助)项目(18XNL015)。

作者简介:郭甲嘉,女,陕西汉中,人,博士研究生,研究方向为资源与环境管理。E-mail: guojiajiajoy@126.com

通讯作者:靳敏,女,辽宁丹东,人,教授,研究方向为资源与环境政策。E-mail: jinmin@ruc.edu.cn

2021年3月

致“原材料”供给不足与“原材料”供给过剩等问题在不同省份同时存在^[5],影响了WEEE回收处理的总体效率,也在一定程度上降低了回收处理的环境效益。

因此,本文拟研究WEEE规范回收处理的环境效益及其空间分布特征,为完善回收处理体系、合理布局与调整回收处理设施,从而提高WEEE回收处理的环境效益提供参考。

2 文献综述

国际上日本^[6]、挪威^[7]、法国^[8]、欧盟^[9]等学者从不同视角、通过不同方法评估了WEEE回收处理的环境效益。伴随中国绿色发展研究的深入,关于WEEE回收处理的环境效益评估研究主要集中在模型构建、指标选取和测算方法等方面。其中,生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA)作为重要的环境效益测算方法,选取人体健康、生态系统质量、气候变化、资源消耗作为环境效益指标,常用于废弃电冰箱^[10]、废弃手机^[11]、废弃办公设备^[12]、废弃CRT显示器^[13]等单一品类WEEE的环境效益评估研究;然而,该方法对数据清单的全面性和来源统一性要求较高。针对多种类WEEE环境效益测算,有学者^[14]通过保有量系数法、物料系数法、市场价值法及污染系数法等,估算了部分区域废弃电视、电冰箱、空调、洗衣机和计算机(“四机一脑”)的产生量与回收处理的环境效益。

此外,从空间视角分析WEEE产生量分布、省际间流动格局的研究也取得了一定成果。刘志峰等^[5]利用Compertz模型及保有量系数法对WEEE产生量及其空间分布进行了研究;李博等^[15]采用市场供给A模型、消费与使用模型和注册更新模型分析了中国废旧手机产生量的空间分布情况;童昕等^[16,17]采用空间相互作用模型,分析了中国WEEE省际间流动格局,发现WEEE跨省流动量占中国WEEE回收处理总量的1/3以上。

综上所述,WEEE回收处理环境效益的量化评估研究较为全面,也有关于WEEE产生量空间分布差异和回收处理省际流动的研究,但是评估特定地理空间单元内WEEE回收处理环境效益空间分布特征的研究目前还较少。据此,本文立足全国和省级尺度,基于2020年中国WEEE回收处理量的估算结果,测算了各省份回收处理所产生的节约原材料

和能源(以矿石和标准煤为指标)、减少污染物排放(以废气、废水、废渣和重金属为指标)及减少温室气体排放(以CO₂减排量为指标)3类环境效益,并运用空间自相关方法分析了环境效益的空间格局,以期对进一步调整回收处理设施的规划和布局,提高规范回收处理的环境效益提供借鉴。

3 研究方法数据来源

3.1 研究思路和框架

本文首先基于保有量系数法估算2020年中国31个省份(因数据缺失,不包括港澳台地区)的WEEE产生量,在WEEE充分规范回收处理(WEEE产生量被100%规范回收处理)情景下进行WEEE的省际间流动修正,得到各省份WEEE回收处理量;进而从节约原材料和能源、减少污染物排放、减少温室气体排放3个方面分别测算WEEE回收处理的环境效益,并结合全局和局部Moran's I指数进行空间自相关性分析,探讨WEEE回收处理环境效益的空间分布特征。为最大程度保障研究时效性,本文测算的WEEE产生量、回收处理量和环境效益均为2020年数据。

3.2 WEEE产生量及环境效益测算方法

WEEE产生量的估算是其环境效益测算的前提。现有估算方法可大致归纳为13种^[18],不同方法在应用方面具有不同的数据需求及局限性。由于中国电器电子产品销售和库存的历史数据是零星和不完整的^[19],本文基于地区间数据通用性和权威可靠性的考虑,选用各地统计年鉴获得的农村/城镇百户家庭耐用品拥有量数据。由于电器电子产品使用寿命范围较广,简单采用平均寿命估算可能产生较大误差^[19],保有量系数法则将报废高峰年限纳入考虑,同时相对误差在10%以内^[5,20],应用效果好,故本文最终选取保有量系数法对各省份WEEE产生量进行估算。

保有量系数法假设电器电子产品在达到报废年限之前的数年内报废概率相同。若第 m 年至第 n 年为某类电器电子产品的报废高峰期,则第 $t+m$ 年该类WEEE产生量为:

$$P_{t+m} = H_t \times \frac{\theta}{(n-m+1)} \quad (1)$$

$$H_t = (H_t^u \times N_t^u + H_t^c \times N_t^c) / 100 \quad (2)$$

$$Q_{t+m} = P_{t+m} \times (\alpha + 1) \quad (3)$$

式中: P_{t+m} 为第 $t+m$ 年居民家庭某类 WEEE 的产生量, 单位为万台; H_t 为第 t 年该类产品的社会保有量, 单位为万台; θ 为该类产品的报废系数, 即该产品在第 $t+m$ 年至第 $t+n$ 年间的报废量占第 t 年时社会保有量的比例, m 和 n 分别为产品的最低和最高报废年限。中国家用电器研究院的相关研究将电视、电冰箱、空调、洗衣机等传统耐用家电的报废年限设定为 10~16 年, 计算机设定为 4~6 年。 H_t^u 和 H_t^c 分别为第 t 年城镇和农村每百户家庭拥有的该类电器电子产品数量, 单位为台/(100 户); N_t^u 和 N_t^c 为城镇和农村家庭户数, 单位为户; Q_{t+m} 为第 $t+m$ 年某类 WEEE 的社会总产生量; α 为组织机构 WEEE 产生量占居民家庭 WEEE 产生量的比例。WEEE 来源于居民家庭和组织机构两部分, 不同类型产品的 α 取值不同, 其中电视机设为 5%, 洗衣机和电冰箱设为 2%, 废弃空调和计算机设为 30%^[21]。

在不考虑 WEEE 省际间流动且 WEEE 充分规范回收处理情景下, 默认回收处理的 WEEE 全部来自于本地产生量。则回收处理某类 WEEE 产生的环境效益可表示为^[14]:

$$E_{t+m}^i = M_{t+m}^i \times w_i \times \varphi \quad (4)$$

式中: E_{t+m}^i 为第 $t+m$ 年 i 类 WEEE 回收处理产生的环境效益, 单位为 t; M_{t+m}^i 为第 $t+m$ 年 i 类 WEEE 回收处理量, 单位为万台; w_i 为每万台该类产品的平均重量, 单位为 t/万台; φ 为每吨产品回收处理产生的环境效益。

3.3 WEEE 省际间流动修正

WEEE 存在显著的省际间流动, 由此造成的回收处理量 and 环境效益估算偏差需要考虑。然而, 目前中国并没有 WEEE 省际间流动的准确统计数据, 本文基于 Tong 等^[17]研究结论, 假设所有省份 WEEE 回收处理总量中约有 1/3 来自其他省份。在 WEEE 充分规范回收处理情景下, 各省份 WEEE 省际间流入量全部被回收处理, 从而 (5) 式成立。对 WEEE 产生量估算方法作如下的进一步修正:

$$(1-a) \times A = \frac{1}{3} M_{t+m} \quad (5)$$

$$Q_{t+m} - a \times A = \frac{2}{3} M_{t+m} \quad (6)$$

式中: a 为某省份 WEEE 流出量占该省 WEEE 省际间流动总量的比例, 取值参考 Tong 等^[17]; A 为某省

份 WEEE 省际间流动总量。由此可推导出:

$$M_{t+m} = k Q_{t+m} = \frac{3(1-a)}{(2-a)} Q_{t+m} \quad (7)$$

式中: $k = \frac{3(1-a)}{(2-a)}$, 即为修正系数, 表明在考虑

WEEE 省际间流动情况下, 每省 WEEE 产生量中本地 WEEE 回收处理量的占比。

3.4 空间自相关分析方法

全局空间自相关描绘了相关变量在区域整体范围内的空间依赖程度, 常采用全局 Moran's I 指数进行分析, 本文运用该方法分析中国 WEEE 回收处理环境效益在空间上是否有相关性。当全局 Moran's I 指数 > 0 时, 表示 WEEE 回收处理的环境效益空间分布存在空间正相关, 其值越接近 1, 省份之间的环境效益越相似; 当全局 Moran's I 指数 < 0 时, 表示 WEEE 回收处理的环境效益空间分布存在空间负相关, 其值越接近 -1, 省份之间的环境效益差异越大; 当全局 Moran's I 指数 $= 0$ 时, 表示不存在空间相关性。

局部空间自相关则进一步揭示每个地域单元与其邻近空间单元的属性特征之间的相似性或相关性^[22], 常采用局部 Moran's I 指数进行分析, 本文采用该方法探讨各省份自身及其邻近省份的 WEEE 回收处理环境效益的集聚特征, 可分为“高-高集聚”“低-低集聚”“低-高异常”和“高-低异常”4 种类型。

3.5 数据来源

本文主要涉及的数据是城镇/农村家庭户数、分地区城镇/农村居民平均每百户年末 (2008 年, 2010 年, 2014 年, 2016 年) 主要耐用消费品拥有量、报废系数、电器电子产品平均重量、WEEE 回收处理的环境效益清单数据和省际间流动修正系数。

中国 31 个省份城镇/农村家庭户数、分地区城镇/农村居民平均每百户年末主要耐用消费品拥有量数据来源于 2009 年、2011 年、2015 年和 2017 年的《中国统计年鉴》^[22]。分地区城镇/农村居民平均每百户年末主要耐用消费品拥有量数据选取了彩色电视机、电冰箱、空调、洗衣机和计算机 5 类消费品的数据, 因为废弃“四机一脑” (电视、电冰箱、空调、洗衣机和计算机) 是回收利用重要品类, 在 WEEE

2021年3月

总量中占比较高^[24],具有代表性和典型性。因此,本文以城镇/农村每百户家庭“四机一脑”保有量来估算2020年WEEE产生量。

电器电子产品在报废年限内的平均报废率一般在40%~60%之间^[20]。为确定报废系数,本文以2008年各省份城乡户数、城乡每百户家庭电视、电冰箱、空调、洗衣机拥有量和2014年各省份城乡户数、城乡每百户家庭计算机拥有量为基础数据,分别按照40%、50%、60%的报废系数估算2018年各省份的WEEE产生量,与中国家用电器研究院公布的

2018年数据进行对比,选取各省份相对误差在10%以内的对应报废系数并检验(表1)。经验证,各省份在对应报废系数下的WEEE产生总量为14862.0万台,与2018年WEEE产生总量15090.6万台的相对误差为1.5%,可认为报废系数的选取可靠。

为估算省际流动情景下的WEEE回收处理量,各省份WEEE省际间流动占比数据参考Tong等^[17]研究成果,省际间流动占比及修正系数(表1)。每类电器电子产品的平均重量及其环境效益相关数据引自陈盼等^[14]的研究成果(表2)。

表1 各省份WEEE报废系数 θ 、省际间流动占比 a 及修正系数 k

Table 1 Waste electrical and electronic equipment (WEEE) end-of-life factor θ , inter-provincial mobility share a , and correction factor k by province

区域	省份	报废系数/%	流入量占比/% ^[17]	流出量占比/% ^[17]	修正系数
东部地区	北京	60	60	40	1.13
	天津	60	70	30	1.24
	河北	40	35	65	0.78
	上海	60	60	40	1.13
	江苏	50	55	45	1.06
	浙江	50	45	55	0.93
	福建	50	30	70	0.69
	山东	50	45	55	0.93
	广东	50	55	45	1.06
	海南	60	0	0	1.00
东北地区	吉林	50	40	60	0.86
	黑龙江	40	50	50	1.00
	辽宁	50	10	90	0.27
中部地区	山西	50	60	40	1.13
	安徽	50	40	60	0.86
	江西	60	50	50	1.00
	河南	50	40	60	0.86
	湖北	50	55	45	1.06
	湖南	50	55	45	1.06
西部地区	内蒙古	60	50	50	1.00
	新疆	40	50	50	1.00
	宁夏	40	0	0	1.00
	陕西	60	50	50	1.00
	甘肃	60	40	60	0.86
	青海	40	0	0	1.00
	重庆	40	70	30	1.24
	四川	50	45	55	0.93
	西藏	40	0	0	1.00
	广西	50	50	50	1.00
	云南	60	0	0	1.00
	贵州	60	0	0	1.00

表2 电器电子产品平均重量及环境效益相关参数^[14]

Table 2 Parameters related to average weight and environmental benefits of electrical and electronic products^[14]

类型	平均重量 kg/台	节约原材料或能源/t		减少污染物/t				减少温室气体 (CO ₂)/t
		矿石	标准煤	废水	废气	废渣	重金属	
洗衣机	23.47	6.20	1.04	18.25	6.77	6.55	0.01	0.55
冰箱	40.09	15.00	2.27	23.40	10.58	13.90	0.0024	0.47
空调	52.38	26.20	3.21	29.50	10.31	21.10	0.0072	1.06
电视	20.00	9.19	1.38	16.32	7.82	8.48	0.48	0.13
计算机	10.00	18.30	2.71	24.58	8.87	16.98	0.44	0.26

4 结果与分析

4.1 WEEE产生量及回收处理量估算与分析

基于上述数据,依据公式(1)–(3)估算得到:2020年中国31个省份WEEE产生总量为16711.3万台,共计415.3万t。将本文估算结果与已有文献研究中的估算结果^[5]进行交叉验证(表3),验证误差在

表3 2020年WEEE产生量估算结果验证

Table 3 Validation of estimation result of waste electrical and electronic equipment (WEEE) generation, 2020

省(市、区)	本文预测值/万台	文献预测值/万台 ^[5]	误差/%
北京	456.1	441.0	3.31
山西	406.3	417.0	2.65
内蒙古	299.7	292.9	2.27
辽宁	540.8	560.5	3.64
江苏	1381.1	1437.6	4.09
陕西	497.9	507.9	2.00
甘肃	284.5	291.1	2.33

5.00%以内,通过可靠性检验。

考虑WEEE省际间流动且WEEE充分规范回收处理情景下,依据公式(5)–(7),估算得到WEEE的规范回收处理总量(图1)。结果显示,2020年中国WEEE规范回收处理量为16006.1万台,合计400.0万t,并呈现由东部沿海向西部内陆逐渐降低的趋势。其中,规范回收处理量超千万台的省份集中分布在东部沿海地区,从高到低依次为广东、江苏和山东,中部地区各省份的WEEE规范回收处理量大多位于500.0万~1000.0万台区间范围内,西部地区各省份规范回收处理量则显著降低。

4.2 WEEE规范回收处理的环境效益分析

全面促进资源能源节约、加强污染防治和应对气候变化是改善生态环境质量和推动绿色发展的重要途径。考虑WEEE省际间流动且WEEE充分规范回收处理情景下,2020年WEEE规范回收处理

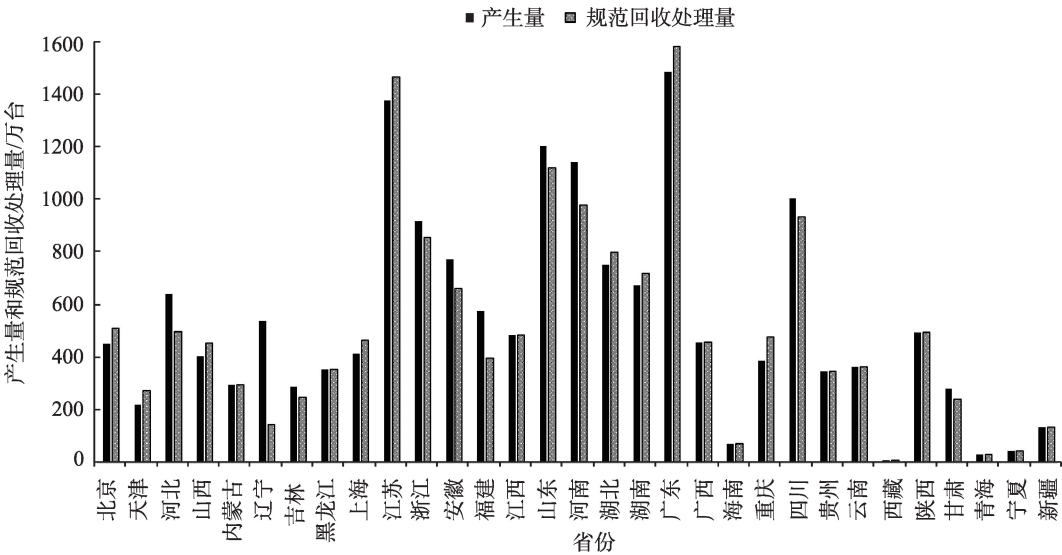


图1 2020年中国各省份WEEE产生量和回收处理量

Figure 1 Provincial waste electrical and electronic equipment (WEEE) generation and recycling in China, 2020

2021年3月

理论上可产生的环境效益为:节约原材料和能源7621.5万t、减少污染物排放18978.9万t、减少温室气体排放232.7万t(表4)。

为进一步展现WEEE回收处理产生环境效益的区域差异,本文以省级行政区域为单元,通过Arcgis10.3软件将3类环境效益标注于基础底图(图2)。

总体来看,2020年WEEE回收处理产生的节约

原材料和能源、减少污染物排放和减少温室气体排放3类环境效益的区域差异与“胡焕庸线”吻合,呈现出“东部强,西部弱”的总体格局。广东省和江苏省的3类环境效益均远高于其他省份,节约原材料和能源分别为968.8万t和793.3万t,均超过700.0万t、减少污染物排放分别为2267.4万t和1907.7万t,均超过1900.0万t、减少温室气体排放分别为31.0万t和24.9万t,均超过24.0万t。浙江、山东、河南、四

表4 WEEE省际间流动情景下各省份WEEE回收处理产生的环境效益

Table 4 Environmental benefits of waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling and disposal in the provinces and municipalities of China's mainland under the scenario of interprovincial movement of WEEE

省份	节约原材料和能源/万t			减少污染物排放/万t					减少温室气体/万t (CO ₂)
	矿石	标准煤	总计	废水	废气	废渣	重金属	总计	
北京	280.2	37.1	317.3	367.9	140.2	238.4	1.6	748.2	10.2
天津	143.5	19.2	162.6	191.2	73.4	122.8	0.9	388.2	5.2
河北	182.8	25.5	208.3	266.1	105.4	161.6	1.9	535.0	6.2
山西	132.6	19.2	151.8	207.8	84.1	120.5	1.9	414.2	4.3
内蒙古	81.7	12.2	93.9	134.7	56.3	75.8	1.2	268.0	2.5
辽宁	45.1	6.6	51.6	70.5	28.9	41.0	0.6	141.0	1.4
吉林	64.2	9.6	73.8	107.0	44.7	59.8	1.1	212.5	2.0
黑龙江	95.0	14.2	109.2	159.4	66.8	88.4	1.5	316.0	3.0
上海	240.5	31.9	272.5	315.9	120.7	205.0	1.7	643.3	8.6
江苏	699.6	93.7	793.3	940.4	361.6	600.3	5.4	1907.7	24.9
浙江	437.7	58.3	496.0	578.6	222.3	373.7	3.2	1177.7	15.6
安徽	292.7	40.0	332.6	409.1	161.3	254.4	2.5	827.4	10.3
福建	195.6	26.2	221.8	262.3	101.3	167.8	1.5	532.9	6.9
江西	200.7	27.6	228.3	280.4	111.4	175.2	2.0	569.0	6.7
山东	425.0	59.2	484.2	612.6	242.9	375.0	4.3	1234.8	14.4
河南	399.3	54.8	454.1	565.7	221.3	348.6	3.7	1139.3	14.1
湖北	344.3	47.1	391.4	480.3	188.8	299.6	3.1	971.8	11.9
湖南	307.2	42.1	349.4	433.3	171.3	267.9	2.8	875.3	10.7
广东	855.8	113.0	968.8	1113.3	422.2	726.6	5.4	2267.4	31.0
广西	177.2	24.4	201.7	247.8	97.9	155.2	1.9	502.8	5.8
海南	26.9	3.7	30.6	38.4	15.4	23.6	0.4	77.8	0.8
重庆	228.4	30.8	259.2	309.7	120.2	196.8	1.7	628.5	8.1
四川	366.0	50.8	416.9	531.6	212.0	322.3	3.7	1069.5	12.7
贵州	88.0	13.2	101.1	149.7	62.9	81.8	1.6	296.0	2.8
云南	86.2	13.1	99.2	148.0	62.7	80.9	1.8	293.4	2.5
西藏	2.7	0.4	3.1	4.4	1.9	2.5	0.1	8.8	0.1
陕西	190.7	26.3	217.1	274.8	108.2	167.4	2.0	552.3	6.6
甘肃	56.4	8.5	64.9	95.0	39.4	52.8	1.1	188.3	1.7
青海	8.9	1.4	10.3	15.4	6.5	8.4	0.1	30.5	0.3
宁夏	11.9	1.8	13.6	19.9	8.3	11.0	0.2	39.5	0.4
新疆	37.2	5.6	42.8	61.1	25.6	34.5	0.6	121.8	1.1
总计	6704.0	917.6	7621.5	9392.2	3685.7	5839.8	61.2	18978.9	232.7

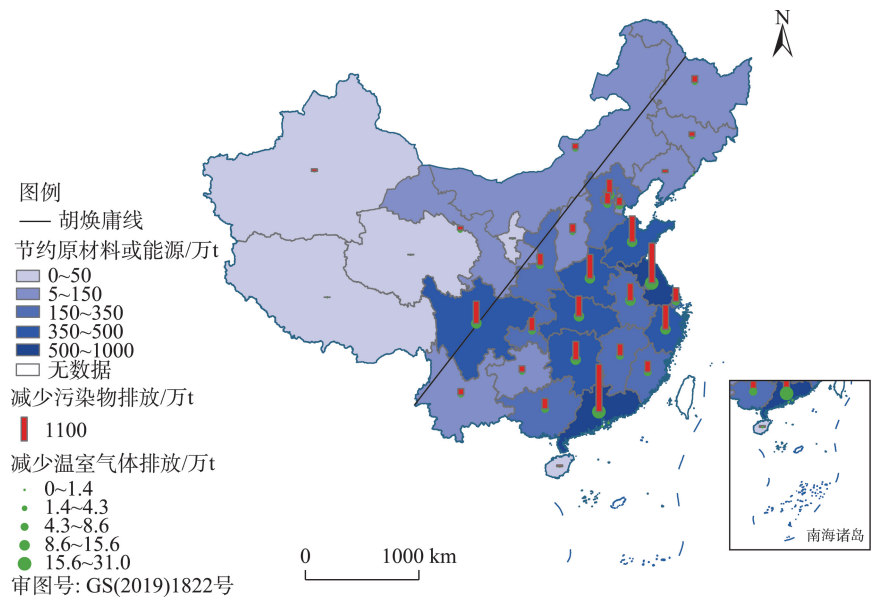


图2 2020年中国WEEE规范回收处理环境效益的空间分布格局

Figure 2 Spatial distribution pattern of environmental benefits from recycling and disposal of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in China, 2020

川、湖北、湖南、安徽、北京、上海和重庆10省(市)的3类环境效益居中,节约原材料和能源250.0万~500.0万t、减少污染物排放600.0万~1200.0万t、减少温室气体排放8.0万~16.0万t。新疆、海南、宁夏、青海和西藏则位于后5位,其中,西藏的环境效益排于末位,节约原材料和能源为3.1万t,减少污染物排放为8.8万t,减少温室气体排放为0.1万t。其他省份处于重庆与新疆之间,节约原材料和能源50.0万~250.0万t,减少污染物排放140.0万~600.0万t,减少温室气体排放1.2万~7.0万t(表4)。WEEE规范回收处理环境效益的区域差异与“胡焕庸线”两侧的政治、经济、社会和技术等方面差异密切相关。从“原材料”供给来看,WEEE回收处理是环境效益产生的前提条件,东部地区的密集人口为本区域回收处理提供了丰富的WEEE“原材料”,较高的经济发展水平加速了电器电子产品的消费能力与淘汰速率,进一步巩固了“原材料”优势。从行业发展能力来看,东部地区的经济发展水平和工业化水平为回收处理行业提供了良好的依托条件和发展基础,东部地区的再生资源产业起步早于西部地区,且集聚化程度和专业化水平等均高于西部地区,有助于产生更高的单位环境效益。从行业支持环境来看,东部地区的人才储备、地方支持能力和再生产业资

本投入都优于西部地区,最终导致“东强西弱”区域特征的形成。

4.3 WEEE回收处理环境效益的空间分布分析

全局Moran's *I*指数分析显示,省际流动修正前后不同省份WEEE回收处理的环境效益在空间上均存在整体关联性。3类环境效益的全局Moran's *I*指数均在0.280以上,且通过显著性检验(表5),说明从省级行政区划尺度看WEEE回收处理的环境效益呈正空间自相关。WEEE回收处理环境效益较高的省份相互邻近,环境效益较低的省份也相互邻近,具有较强的空间关联性。进行WEEE省际间流动修正后,3类环境效益全局Moran's *I*指数平均值由0.315降低至0.283,空间相关性下降、环境效益集聚程度降低,说明WEEE省际间流动对各地区WEEE回收处理的环境效益空间分布特征存在较为

表5 环境效益全局Moran's *I*指数

Table 5 Global Moran's *I* index of environmental benefits

环境效益类型	修正前的全局 Moran's <i>I</i> 指数(<i>P</i> 值)	修正后的全局 Moran's <i>I</i> 指数(<i>P</i> 值)
节约原材料 和能源	0.320(0.004)	0.287(0.01)
减少污染物 排放	0.311(0.004)	0.283(0.01)
减少温室 气体排放	0.315(0.005)	0.280(0.009)

2021年3月

明显的影响。

局部Moran's I 指数分析显示,WEEE回收处理的3类环境效益局部自相关聚类结果完全一致(表6),呈现出“东部沿海高-高集聚”和“北部省份低-低集聚”的空间分布格局。“东部沿海高-高集聚”具体表现为江苏、安徽、上海和山东呈高-高集聚状态,说明上述省份地理位置邻近,WEEE回收处理在节约原材料和能源、减少污染物排放和减少温室气体排放3方面都取得了高效益。首先,江苏、安徽、上海和山东4个省份经济发展水平和人口数量处于全国前列,本地产生的WEEE数量高于其他区域,为回收处理提供了“原材料”基础;其次,4个省份的交通运输条件与集群化水平为回收处理产业链一体化发展奠定了联动保障,所形成的跨区域产业网络不仅可以解决本区域WEEE回收处理问题,还“吸引接纳”了其他区域的WEEE;最后,4个省份在绿色低碳发展所获取的国家支持和地方投入为提升WEEE回收处理环境效益提供了资金和技术支撑,体现出行业技术水平、科技创新能力和政策支持对WEEE回收处理规模化的积极影响。借助于“原材料”、经济技术、集群化和一体化基础等因素共同作用,上述4个省份形成了区域联动高效发展的格局,提供了WEEE回收处理的正面典范。

“北部省份低-低集聚”具体表现为新疆、甘肃、

内蒙古和吉林呈现低-低集聚状态,说明上述省(区)的回收处理效益并不理想,这是由于它们人口稀少且分散,WEEE回收处理“原材料”基础薄弱,不够发达的交通网络不利于WEEE收集和转运,也影响了省区间再生产产业链的跨省际联动;此外,上述省区的经济发展水平和回收处理技术相对落后,未能给回收处理行业提供发展“沃土”,最终导致低值区在北部省份集聚。因此,提高低值区WEEE回收处理环境效益需要综合考虑人口集散情况、交通运输网络和相邻省份产业链联动潜力等因素,并将其纳入回收处理设施规划与调整的决策进程。

此外,福建和江西呈现低-高异常状态,这说明WEEE回收处理的环境效益不理想,同时被广东、湖北、湖南、浙江和安徽环境效益良好的高值区围绕;该状态的形成是由于福建和江西两省的回收处理量较少且相关技术能力薄弱,限制了WEEE回收处理产生的环境效益。此外,两省本地产生的WEEE存在省际流出情形,流入了邻近高值省份,导致福建和江西回收处理的“原材料”不足。地处西南区域的四川省则表现出高-低异常状态,说明WEEE回收处理给四川省带来了较好的环境效益,但其邻近的云南、贵州、青海、西藏、甘肃等省(区)的环境效益并不理想,形成高值区被低值区围绕的分布状态,这不仅源于四川远高于相邻省(区)的经济发展水平优势,还有赖于成都位于西部人口最为稠密、产业集群化和城镇密度最高的成渝经济圈,推动四川成为回收处理行业依托、人才储备和资本投入的“领头羊”。

结合上述WEEE回收处理环境效益的测算结果,位于环境效益前5位中的广东、浙江和河南并未形成高-高集聚的分布特征,说明广东、浙江和河南3省的区域辐射带动能力还有待提升。广东和浙江邻近福建和江西,使其在“原材料”供给上获得了优势,WEEE回收处理量增加产生较高的环境效益。中部的河南省虽然与山东和安徽两个环境效益高的省份接壤,但其邻近的西部省份环境效益低下,因此并未形成高-高集聚状态,这同时说明需要进一步发挥河南省对西部邻近省份的辐射带动作用,进一步提升西部省份的环境效益。

表6 修正后的环境效益局部自相关聚类结果

Table 6 Modified partial autocorrelation clustering results for environmental benefits

环境效益类型	空间分布类型	省份
节约原材料和能源	高-高	山东、江苏、安徽、上海
	低-低	新疆、甘肃、内蒙、吉林
	低-高	福建、江西
	高-低	四川
减少污染物排放	高-高	山东、江苏、安徽、上海
	低-低	新疆、甘肃、内蒙、吉林
	低-高	福建、江西
	高-低	四川
减少温室气体排放	高-高	山东、江苏、安徽、上海
	低-低	新疆、甘肃、内蒙、吉林
	低-高	福建、江西
	高-低	四川

5 结论与政策建议

5.1 结论

本文基于保有量系数法估算了中国31个省份的WEEE产生量数据,通过WEEE省际间流动修正后得到各省份的WEEE回收处理量,进而评估了WEEE回收处理的环境效益,并引入空间自相关指数探讨了WEEE回收处理环境效益的空间分布特征。主要研究结论如下:

(1)中国WEEE产生量及回收处理量存在较为明显的省际差异,并呈现出由东向西逐渐降低的趋势。WEEE产生量及回收处理量超千万台的省份集中分布在东部沿海地带,从高到低依次为广东、江苏和山东。中部地区各省份的WEEE产生量及规范回收处理量大多位于500.0万~1000.0万台区间范围内,西部地区各省份的WEEE产生量及规范回收处理量则显著降低。

(2)在省际流动的情景下,2020年中国WEEE回收处理产生环境效益的区域差异与“胡焕庸线”吻合,呈现出“东部强,西部弱”的总体格局。高效益地区主要分布于经济发展水平高、交通运输便利和人口稠密的东南沿海省份,所具备的“原材料”基础、行业发展能力与外部环境支持都对提升WEEE回收处理环境效益起到积极作用。

(3)WEEE回收处理产生的环境效益存在空间正相关,3类环境效益的局部空间关联特征显示出一致性,表现为“东部沿海高-高集聚”“北部省份低-低集聚”、福建省和江西省低-高异常、四川省高-低异常的空间分布格局。“东部沿海高-高集聚”具体表现为江苏、安徽、上海和山东呈高-高集聚状态;“北部省份低-低集聚”具体表现为新疆、甘肃、内蒙古和吉林呈现低-低集聚状态;福建省和江西省的低-高异常状态具体表现为自身环境效益不理想,同时被广东、湖北、湖南、浙江和安徽环境效益良好的高值区围绕;四川省的高-低异常状态表现为自身环境效益良好,同时被邻近的云南、贵州、青海、西藏、甘肃等环境效益不理想的低值区围绕。

(4)综合WEEE回收处理环境效益和局部Moran's I 指数的分析结果,位于环境效益前5位中的广东、浙江和河南并未形成高-高集聚的分布特征。广东和浙江邻近WEEE省际流出显著的福建

和江西,WEEE回收处理量增加带来较高的环境效益;中部的河南省虽然与山东和安徽两个环境效益高的省份接壤,但其邻近的西部省份环境效益低下,难以形成高-高集聚状态。这说明广东、浙江和河南WEEE规范回收处理的环境效益良好,但未能对邻近低效益省份产生带动和辐射作用。

5.2 政策建议

基于上述研究结论,本文提出以下政策建议:

(1)根据国家“十四五规划”关于“加快构建废旧物资循环利用体系”的要求和《废弃电器电子产品回收处理管理条例》,WEEE规范回收处理体系布局要拓展顶层设计的视角与尺度,在全国一盘棋的思路下推动跨区域联动发展,制定东部地区与西部地区的跨区域联动协作计划,通过对口帮扶、经验交流和发展援助等形式帮助低效益区域完善WEEE回收处理体系。

(2)WEEE回收处理设施的规划应充分考虑省际流动情形,从区域空间尺度对WEEE回收处理设施及能力进行布局,构建符合经济发展、技术水平、地方政策和产业环境等现实条件的基础设施体系,避免供需错位导致的“无米下炊”或“原材料供给过剩”,提高WEEE回收处理的总体效率和环境效益。

(3)未来需要重点关注并提高具有明显环境效益集聚优势的省份WEEE规范回收处理设施的利用率。将高-高集聚区域作为WEEE规范回收处理设施规划和布局的重点地区,实施区域一体化管理,着重提高目前回收处理设施的利用率,提升区域WEEE规范回收处理设施的环境效益。

(4)进一步挖掘潜力并充分发挥环境效益较高省份WEEE回收处理设施的带动和辐射作用。加强四川、广东、浙江和河南4省的WEEE回收处理能力,带动其周边区域协同发展,特别是发挥四川和河南对西部邻近省份的辐射带动作用,进一步提升西部省份的环境效益。

参考文献(References):

- [1] 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

2021年3月

- Nonferrous Metals, 2018, 28(2): 365–376.]
- [2] 徐鹤, 周婉颖. 日本电子废弃物管理及对我国的启示[J]. 环境保护, 2019, 47(18): 59–62. [Xu H, Zhou W Y. E-waste management of Japan and its enlightenment to China[J]. Environmental Protection, 2019, 47(18): 59–62.]
- [3] 宋小龙, 王景伟, 杨建新, 等. 电子废弃物生命周期管理: 需求、策略及展望[J]. 生态经济, 2016, 32(1): 105–110. [Song X L, Wang J W, Yang J X, et al. Life cycle management of e-waste: Requirement, strategy and prospect[J]. Ecological Economy, 2016, 32(1): 105–110.]
- [4] 童昕, 王涛, 黄慧婷, 等. 中国电子废物循环利用空间优化[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3868–3873. [Tong X, Wang T, Huang H T, et al. Spatial optimization of e-waste recycling in China[J]. China Environmental Science, 2018, 38(10): 3868–3873.]
- [5] 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[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1875–1882. [Liu Z F, Xue Y Q, Huang H H. Prediction of the quantities of waste electric and electronic products in Mainland China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1875–1882.]
- [6] Menikpura S N M, Santo A, Hotta Y. Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 74: 183–190.
- [7] Baxter J, Lyng K A, Askham C, et al. High-quality collection and disposal of WEEE: Environmental impacts and resultant issues[J]. Waste Management, 2016, 57: 17–26.
- [8] Horta A R, Charbuillet C, Berthoud F, et al. What are the environmental benefits of increasing the WEEE treatment in France?[J]. Electronics Goes Green, 2016, DOI: 10.1109/EGG.2016.7829872.
- [9] Ab Stevels, 赵明, 朱雪梅, 等. 试论欧盟报废电子电器设备指令(WEEE)的生态效益[J]. 家电科技, 2005, (4): 50–53. [Ab Stevels, Zhao M, Zhu X M, et al. Is the WEEE Directive eco-efficient[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2005, (4): 50–53.]
- [10] 宋小龙, 王景伟, 吕彬, 等. 电子废弃物资源化全生命周期碳减排效益评估: 以废弃电冰箱为例[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3448–3454. [Song X L, Wang J W, Lü B, et al. Assessing GHG reduction benefit of WEEE recycling from a life cycle perspective: A case study of waste refrigerator[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(7): 3448–3454.]
- [11] 尹建锋. 废弃手机资源化的生命周期评价[D]. 天津: 南开大学, 2014. [Yin J F. Life Cycle Assessment of Waste Mobile Phone Recycling[D]. Tianjin: Nankai University, 2014.]
- [12] 谭全银, 梁扬扬, 董庆银, 等. 废弃办公设备关键部件处理环境影响研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2646–2655. [Tan Q Y, Liang Y Y, Dong Q Y, et al. Study on the environmental impact of waste office equipment critical component treatment[J]. China Environmental Science, 2017, 37(7): 2646–2655.]
- [13] Song Q B, Wang Z S, Li J H, et al. Life cycle assessment of TV sets in China: A case study of the impacts of CRT monitors[J]. Waste Management, 2012, 32(10): 1926–1936.
- [14] 陈盼, 施晓清. 京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1976–1986. [Chen P, Shi X Q. Predicting the recycling potential and evaluating the environmental benefits of waste electrical and electronic equipment in Beijing–Tianjin–Hebei[J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1976–1986.]
- [15] 李博, 杨建新, 吕彬, 等. 中国废旧手机产生量时空分布研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4095–4101. [Li B, Yang J X, Lü B, et al. Temporal and spatial variations of retired mobile phones in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(12): 4095–4101.]
- [16] 童昕, 王涛, 陈彦光, 等. 中国电子废物的地区间流动[J]. 地理科学进展, 2018, 37(7): 954–962. [Tong X, Wang T, Chen Y G, et al. Interregional flows of e-waste in China[J]. Progress in Geography, 2018, 37(7): 954–962.]
- [17] Tong X, Wang T, Chen Y G, et al. Towards an inclusive circular economy: Quantifying the spatial flows of e-waste through the informal sector in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 135, 163–171.
- [18] 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, Lü 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.]
- [19] 金玉, 顾一帆, 张书豪, 等. 废弃电器电子产品产生量估算方法研究趋势分析[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 144–148. [Jin Y, Gu Y F, Zhang S H, et al. Trend analysis on estimation method for generation of waste electrical and electronic equipment[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 144–148.]
- [20] 张相锋, 于鲁冀, 张培. 2015年河南省主要废弃电器电子产品产生量及回收量预测分析[J]. 河南科学, 2013, 31(12): 2275–2279. [Zhang X F, Yu L J, Zhang P. The predictive analysis for the output and recovery quantity of main waste electric and electronic products in Henan Province in 2015[J]. Henan Science, 2013, 31(12): 2275–2279.]
- [21] 何逸林, 廖小红, 田晖. 我国家用电器理论报废量测算方法研究及结果分析[J]. 家电科技, 2010, (10): 76–77. [He Y L, Liao X H, Tian H. Research and analysis of theoretical end-of-life measurement methods for household appliances in China[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2010, (10): 76–77.]
- [22] 乔家君, 朱乾坤, 辛向阳. 黄河流域农村贫困特征及其影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 184–196. [Qiao J J, Zhu Q K, Xin X Y. Spatial characteristics and influencing factors of rural poverty

- in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 184–196.]
- [23] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009–2017. [National Bureau of Statistics, PRC. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009–2017.]
- [24] 中国家用电器研究. 中国废弃电器电子产品回收处理及综合利用行业白皮书2019[R]. 滁州: 中国废弃电器电子产品回收处理及综合利用行业白皮书, 2020. [China Household Electric Appliance Research Institute. 2019 White Paper on WEEE Recycling Industry in China[R]. Chuzhou: White Paper on WEEE Recycling Industry in China, 2020.]

Environmental benefits of recycling waste electrical and electronic equipment and spatial distribution

GUO Jiajia, HE Wanqian, JIN Min

(School of Environment and Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Investigating the environmental benefits of the recycling and disposal of waste electrical and electronic equipment (WEEE) and their spatial distribution characteristics can promote the reasonable planning of the recycling system. Based on a market penetration model, this study estimated the recycling capacity of WEEE in 31 provinces of China's mainland in 2020 under the scenario of fully regulated recycling and interprovincial mobility and calculated the environmental benefits, and analyzed the spatial distribution characteristics of environmental benefits by using the spatial autocorrelation method. The results show that: (1) WEEE recycling can save 76.215 million tons of raw material and energy, reduce 189.789 million tons of pollutant emissions, and reduce 2.237 million tons of greenhouse gas emissions in 2020; (2) The environmental benefits of WEEE recycling show an overall pattern of “strong in the east and weak in the west”; and (3) There is a positive global spatial correlation between WEEE recycling and environmental benefits, and the local spatial correlation features are as follows: high-high agglomeration in eastern coastal areas, low-low agglomeration in northern provinces, low-high anomaly in Fujian and Jiangxi Provinces, and high-low anomaly in Sichuan Province. (4) Among the top five provinces for environmental benefits of WEEE recycling, Guangdong, Zhejiang, and Henan do not form a high-high agglomeration spatial feature. Based on this, the article put forward some policy recommendations, including improving the formal and efficient WEEE recycling system, planning the WEEE recycling system at the regional scale, increasing the utilization of WEEE recycling facilities in provinces with obvious agglomeration advantages, and giving full play to the leading and disseminating role of provinces with high environmental benefits.

Key words: waste electrical and electronic equipment; recycling and disposal; environmental benefits; market penetration model; spatial autocorrelation analysis; spatial distribution; agglomeration