doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.09.011

废线路板跨区域回收系统模拟与环境影响评价

牛妍[1,2],王乙舒[1],顾一帆[1,2],吴玉锋[1,2],王恒广[3],郭福[1,2]

(1. 北京工业大学 材料与制造学部,北京 100124;
2. 北京工业大学 循环经济研究院,北京 100124;
3. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心,北京 100101)

摘要:针对废线路板在收集与处置过程中,各区域存在跨地区协调性弱、处置能力不匹配等问题,使用最小距离最大流(MDMF)模型对废线路板跨区域最优流动路径及流量进行模拟,并对优化结果进行环境影响评价。结果表明:随着废线路板产生量逐年增加,根据模拟优化的跨区域回收路径,拥有典型废线路板处理技术的地区,如广东、湖北等都能达到其最大产能,且该条件下环境影响程度较小。本研究为废线路板回收系统的区域协调规划提供了理论支撑。

关键词:废线路板;回收系统;MDMF 模拟;环境影响评价

中图分类号:X705;X76　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-7545(2023)09-0089-09

Simulation and Environmental Impact Assessment of Interregional Recycling System for Waste Circuit Boards

NIU Yan[1,2], WANG Yishu[1], GU Yifan[1,2], WU Yufeng[1,2], WANG Hengguang[3], GUO Fu[1,2]

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Institute of Circular Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. Solid Waste and Chemical Management Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100101, China)

Abstract: Address to weak interregional coordination and mismatch of disposal capacity in various regions during the collection and disposal of waste circuit boards, the minimum distance maximum flow (MDMF) model was used to simulate the optimal flow path and flow of waste circuit boards across regions, and the environmental impact assessment of the optimization results was carried out. The results show that as the amount of waste printed circuit board generation increases year by year, according to the simulated optimized interregional recycling path, areas with typical waste printed circuit board treatment technology, such as Guangdong and Hubei, can reach their maximum production capacity, and the environmental impact under this condition is small. This study provides theoretical support for the regional coordinated planning of waste printed circuit board recycling system.

Key words: waste circuit boards; recycling system; MDMF simulation; environmental impact assessment

线路板作为电子工业的基础,其应用涉及计算机、通信、消费电子、汽车电子、医疗仪器、航空航天等各个领域[1]。截至 2020 年,中国废弃电器电子产品回收处理企业共拆解产生废线路板 58.57 万 t,主

收稿日期:2023-03-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3902603)

作者简介:牛妍(1997-),女,硕士;**通信作者**:郭福(1971-),男,博士,教授

要来自于电视机、空调、冰箱、洗衣机、电脑(简称“四机一脑”)报废后的拆解[2],其中广东、湖南、河南、湖北等 21 个地区报废量占总体的报废量在 90%以上。废线路板金属含量 40%以上,品位是普通矿物中金属品位的几十倍至上百倍,回收价值很高[3-6]。然而,其中的重金属和溴化阻燃剂等有害物质会导致废线路板回收困难[7]。早期大多采用焚烧法对废线路板进行回收,造成严重的环境污染[8-10]。现阶段国内处理废线路板用到的主要技术主要为:协同冶炼、连续热解、自热熔炼、物理分选[11],分布在广东、湖北、江西、湖南、重庆、浙江等地区。

通过现有废线路板在全国流向数据发现,回收处置能力强、技术先进的地区很难接收到其他地区产生的废线路板。这种长期形成的回收体系很难被打破,导致废线路板跨区域回收利用效率低下,典型处理技术无法充分有效得到利用,同时由于不规范的处理对环境也造成很大的压力。因此急需协调废线路板产生与回收处理典型地区之间的物质流转关系,构建以环境—经济效用最大化为目标的废线路板跨区域回收系统。从而,加快统筹建设处置能力,建立跨省市转移“合作共赢”机制[12]。

调研发现,废线路板回收系统的研究甚少,模拟其跨区域回收系统还需探索。GU 等利用 Stock-based 模型发现城市矿产资源潜力指标与产品的保有量、销售量、使用寿命及物质流动信息密切相关[13-16]。田西[17]通过对典型省份废铅产生量、回收量的推算,基于最小距离最大流模型(MDMF),对我国废铅跨省市转移量进行了模拟推算。LI 等[18]研究废弃手机跨区域流动特征,通过对废弃手机区域产生量、拆解量的计算,基于最小距离最大接受量模型模拟废气手机跨区域回收系统。本文拟从废线路板的跨区域回收系统入手,利用 Stock-based 模型核算典型地区的废线路板理论产生量,其次运用 MDMF 模型模拟构建较为完整的废线路板跨区域回收系统,最后针对该回收系统进行环境影响评价。

1 废线路板跨区域回收系统模拟及评价方法分析

1.1 典型地区废线路板产生量推算

电子废弃物中产生的废线路板主要来自于“四机一脑”报废后的拆解,即计算“四机一脑”的产生量,由此可以推算出废线路板产生量。通过中国再生资源信息网及废线路板处理企业实践调查得到“四机一脑”重量,以及其中废线路板占比数据如表 1 所示。

表 1 “四机一脑”重量及废线路板占比

Table 1 Weight of “Four machines and one computer” and proportion of waste circuit board

名称	重量/kg	废线路板占比/%
洗衣机	40	6.5
电冰箱	65	1.8
电视机	35	0.7
空调	50	4.05
电脑	30	8.0

1.1.1 “四机一脑”保有量的推算方法

通过查阅年鉴得到每年各地区人口数,每百户耐用品拥有量,由此得到不同地区每年“四机一脑”的保有量。如式(1)所示:

$$B_i = R_i/100 \times D_i \tag{1}$$

式中,B_i为 i 年保有量(台);R_i为 i 年人口数(万户);D_i为 i 年“四机一脑”每百户拥有量(台)。在查找人口及每百户耐用品拥有量时遇到数据缺失、不合理,不一致等问题时,通过 SPSS 软件回归分析对这部分数据进行补充及修正。

1.1.2 “四机一脑”使用寿命分布

废线路板的回收需考虑寿命变动等问题且需要估计其长期增长趋势。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,因此为了准确测算产品的寿命分布,本文引入了寿命分布模型。对于电子产品,Weibull 分布的精确程度要高于正态分布。因此,选取 Weibull 分布修正调研数据,对其中产品寿命分布进行修正最为恰当,其概率密度函数如式(2)[19]所示:

$$f(t,u,v)=\begin{cases}\dfrac{u}{v}\left(\dfrac{t-t_0}{v}\right)^{v-1}\exp\left[-\left(\dfrac{t-t_0}{v}\right)^{u}\right] & t\geqslant t_0\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{2}$$

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 $g(i)$。

1.1.3 废弃“四机一脑”产生量的推算方法

基于 Stock-based 模型核算各地区废弃产品的资源潜力,如式(3)所示。

$$X_n = B_n - B_{n-1} + W_n$$

$$W_n = \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot g(i) \tag{3}$$

式中,X_n为 EEE 销售量即该系统的流入量(万台);B_n为 EEE 在第 n 年的保有量即存量(万台);W_n为 EEE 淘汰量即报废量(万台);$g(i)$为产品的寿命(%)。

进一步来讲,第 n 年产品的销售量与第 n 年 WEEE 产生量的差值应等于同年 EEE 保有量的增

加值;与此同时,第 n 年电子废弃物产生量应等于第 $n-i$ 年的 EEE 的销售量与其使用 n 年报废比例的乘积之和($i=0,1,2,\cdots,n$)。通过上述模型计算第 n 年 WEEE 产生量数据[20]。

1.2　废线路板跨区域回收体系 MDMF 模拟

1.2.1　模拟方法

MDMF 模型方法是管理学与经济学中的一类经典算法,用来得出网络路径中同时满足“容量”和“费用”两个限制条件下,从路径起点运至路径终点货物运输量最大且运输费用最小的运送方式。研究中建立的模型为基于 Floyd 最短路径算法的 Ford-Fulkerson 迭加算法。基本思路为:各路径经过的起始点和终点的直线距离看成其运输的最短路径,再将终点的货物接收量作为可扩充项,用求解最大流问题的方法将其上的接收量增至最大接收量;终点的接收量增加到最大接收量后,其余各条路径要重新确定距离最近的终点,如此多次迭代,最终得到废线路板的最小距离最大接收量模型[20]。

通过调研及理论分析,确定各地区间中心点位计算各地区间直线距离进行模拟,得到废线路板流量与流向分布(其中,流出端根据国内 109 家废旧电器电子拆解企业的分布地点,以及考虑各省中人口、经济、金融、教育、社会发展的等方面因素,确定中心点位城市进行;流入端根据各地区典型废线路板处理企业所在城市设置中心点位)。模型中每条路径的流量和距离满足式(4):

$$minf = \sum d_{ij}t_{ij}, \sum_j t_{ij} = P_i \tag{4}$$

式中,d_{ij} 表示城市之间的直线距离;t_{ij} 为从运输起点到终点,满足运输总量最优分配且距离最小的运输量;$minf$ 为距离最小的流。

在整个模型中两个重要的约束条件:废线路板产生地区的流出量不能超过各地区废线路板产生量,流入到处理地区的量不能超过其最大处理量。如式(5)所示:

$$\sum_i t_{ij} \leqslant S_j, \sum_i t_{ij} \leqslant R_j \tag{5}$$

式中,S_j 为路径上的最大容量,是起点上每个地区废线路板产生量;R_j 为每个地区的最大处理能力。

1.2.2　模型

基于最小距离最大流(MDMF)算法,分析废线路板跨区域流动机制,模拟废线路板跨区域转移轨迹。根据调研得到北京、河北、山西、辽宁、上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、河南、湖北、湖南、广东、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西 21 个典型地区废线路板产生量占全国 90%以上。各地区废线路板实际处理能力,其中主要为广东、湖北处理能力 6 万 t/a,湖南、江西、重庆、浙江处理能力 3 万 t/a。以该六个地区为主,假设产生的废线路板转移至这六个地区进行处理,若总的产生量大于 6 地处理能力之和,则多出的废线路板平均分配到当地处理。结合典型地区废线路板的产生与需求数量,利用 MATLAB 软件构建 MDMF 模型,推算废线路板跨区域转移量;分析废线路板流动和转化的拓扑结构,形成废线路板产生地区及主要处理地区之间的物质流向及流量分析网络。模型框架如图 1 所示。

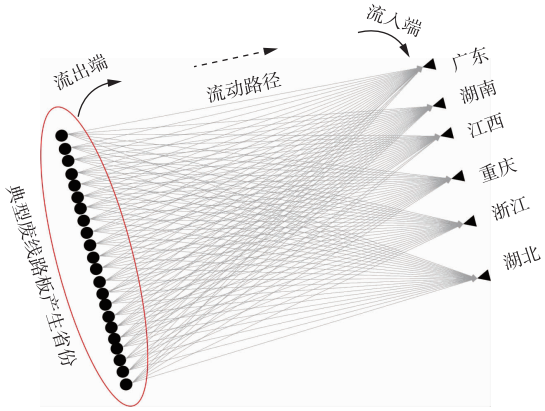

图 1　废线路跨区域转移模型框架

Fig. 1　Typical inter-province transfer model framework of waste circuit board

1.3　废线路板跨区域回收体系环境影响评价

1.3.1　评价方法

在评价软件方面,使用国际上认可度较高的 GaBi 软件数据库来计算环境影响[21]。评价主要是对废线路板跨区域回收体系中交通运输量在运输过程中对环境所造成的影响进行分析评价。在运输过程中主要排放物特征为全球变暖潜能值(GWP)。假设一个产品中的排放物为 CO_2、CH_4、THC、CO、PM_{10}、NO_x、SO_2、VOC、TP、TN、固废 11 种物质。其对应的排放量为 w_i,假设物质对应的 GWP 值为 n_i,则该产品对环境的温室效应影响值如式(6)所示:

$$z = \sum_{i=1}^{n} w_i n_i \tag{6}$$

1.3.2　模型

在运输过程中主要考虑两部分:直接排放和间接排放。直接排放是车辆使用时燃料燃烧的排放;间接排放指燃料生产过程中的排放[22]。因此在已知路径和运输货物量的条件下只需要选择车辆数据和燃料数据即可。在 GaBi 中构建模型框架如图 2

所示,以距离 1 km,载重 1 t 为功能单位对每一种型号的车进行 GWP 100 years 的计算,最终选择 Truck, Euro 6,more than 32 t gross weight / 24.7 t payload capacity ts 对整体的运输体系进行评价。在数据库中选择油型和车辆型号后修改距离及货物重量数值及单位,将两者如图 2 连接起来,可得到燃料的消耗量。

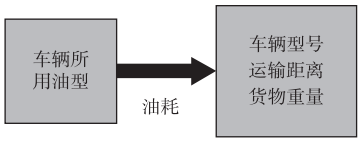

图 2 运输过程环境影响评价模型框架

Fig. 2 Environmental impact assessment model framework of transportation process

2 典型地区废线路板产生量推算结果分析

根据计算以及 SPSS 预测,得到 2005 年到 2030 年我国典型地区“四机一脑”的保有量如表 2 所示。截至 2020 年底,我国典型地区“四机一脑”总保有量达 213 802.17 万台,其中洗衣机 39 688.80 万台,冰箱 41 142.43 万台,电视机 53 810.45 万台,空调 53 508.58 万台,电脑 25 651.91 万台。预测到 2030 年达到 326 647.14 万台。

“四机一脑”报废量如图 3 所示,截至 2020 年报废的“四机一脑”共计 8 808.74 万台,且逐年增长。其中,电视机报废量 2022 年之前在“四机一脑”中位居第一,空调的报废率最大,预测 2022 年之后空调报废量反超电视机,达到第一。2020 年洗衣机报废量 1 881.31 万台,冰箱报废量 1 828.78 万台,电视机报废量 2 143.05 万台,空调报废量 1 780.37 万台,电脑报废量 1 725.25 万台。预测到 2030 年洗衣机报废量 2 578.53 万台,冰箱报废量 2 695.50 万台,电视机报废量 2 878.40 万台,空调报废量 3 766.05 万台,电脑报废量 1 840.76 万台。

表 2 2005—2030 年“四机一脑”保有量及预测

Table 2 The ownership and prediction of “Four machines and one computer” from 2005 to 2030

/10k sets

年份	洗衣机	冰箱	电视机	空调	电脑
2005	24 208.74	21 336.84	35 121.60	16 608.70	8 957.89
2006	25 178.90	22 774.59	36 403.15	18 080.01	10 235.89
2007	26 125.57	23 890.83	37 794.00	20 007.92	11 541.87
2008	27 137.90	25 188.27	39 169.38	21 894.47	12 977.75
2009	28 141.04	26 471.64	40 470.09	23 960.31	14 363.54
2010	29 244.42	27 406.07	41 744.54	26 162.83	15 208.89
2011	30 186.37	28 874.15	42 928.16	28 535.97	17 152.54
2012	31 108.04	30 240.32	44 013.23	30 865.85	18 430.36
2013	31 940.63	31 658.53	45 194.54	33 172.46	19 445.04
2014	33 276.98	33 105.05	46 992.69	35 410.67	20 632.07
2015	34 059.41	34 464.42	48 260.56	37 444.58	21 921.44
2016	35 384.02	36 359.23	49 430.79	40 905.05	22 826.43
2017	36 439.68	37 378.81	50 638.33	43 260.30	23 734.27
2018	37 392.53	38 842.70	51 217.74	48 258.80	23 864.03
2019	38 520.82	39 914.64	52 341.23	51 369.82	24 673.48
2020	39 688.80	41 142.43	53 810.45	53 508.58	25 651.91
2021	41 397.03	43 654.81	57 419.99	58 052.14	29 245.23
2022	42 591.49	45 213.12	58 898.71	61 666.34	30 636.09
2023	43 856.81	46 849.68	60 484.21	65 670.86	32 087.77
2024	45 143.40	48 509.34	62 082.68	69 867.42	33 559.29
2025	46 451.82	50 192.08	63 694.00	74 264.83	35 050.75
2026	47 782.64	51 897.90	65 318.01	78 872.33	36 562.24
2027	49 136.44	53 626.79	66 954.59	83 699.61	38 093.85
2028	50 513.84	55 378.74	68 603.58	88 756.90	39 645.66
2029	51 915.43	57 153.72	70 264.84	94 054.94	41 217.75
2030	53 341.85	58 951.74	71 938.25	99 605.11	42 810.20

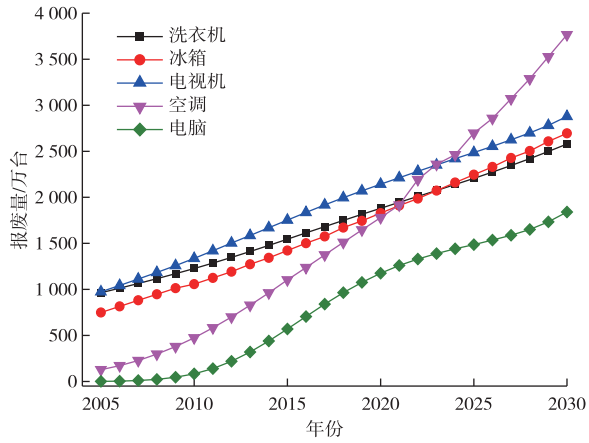

图 3　2005—2030 年“四机一脑”报废量及预测

Fig. 3　Scrap volume and forecast of “Four machines and one computer” from 2005 to 2030

根据表 1 计算得到废线路板报废量如图 4 所示。由图 4 可以明显看出废线路板的产生量逐年增加。主要分布在广东、湖南、四川、安徽、江苏、河南、山东、河北这几个地区。2020 年 21 个典型地区总共拆解废线路板 18.7 万 t，预测 2030 年废线路板总量将会达到 29.05 万 t。

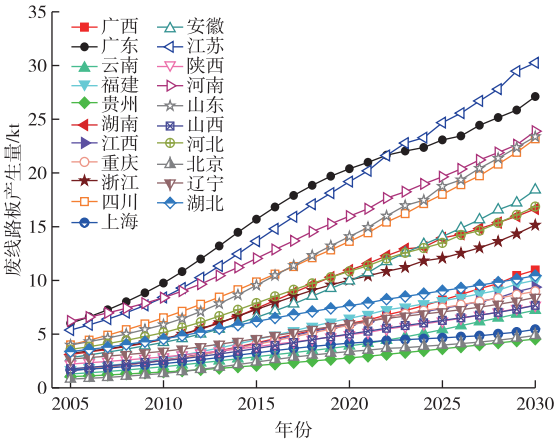

图 4　2005—2030 年典型地区废线路板报废量及预测

Fig. 4　Scrap volume and forecast of waste circuit boards in typical areas from 2005 to 2030

3　废线路板跨区域回收体系 MDMF 模拟结果分析

模拟预测 2020—2030 年废线路板跨区域转移情况如图 5 所示。由图 5 可得：通过模拟各地区废线路板回收处理量较实际数量均得到了有效提升。在废线路板数量小于 6 省总处理能力时，根据 MDMF 的模拟，重庆、浙江、湖北废线路板接受量在 2020 年率先达到最大值。随着废线路板数量的增加，本该转移到湖北、重庆、浙江这三地区的废线路板由于其已经达到处理量的最大值，从而转移到广东、湖南以及江西这三地，促使这三个地区回收的废线路板也分别在 2026 年、2022 年、2021 年接收量达到其处理的最大值。具体分析如下。

由图 5(a)可得：广东处理废线路板将近一半来自于本地。2020—2022 年，仅有广西的废线路板转移到广东；2023 年开始，贵州、福建有少量废线路板转移到广东；2024 年开始，云南废线路板部分转移到广东。广西、贵州、福建、云南地区废线路板转移量逐年增加，且均在 2026 年后逐年减少。2025 年开始，陕西、江苏分别向广东转移废线路板并逐年增加，且江苏转移量在 2026 年超过广西，成为除广东本地外主要废线路板提供地区。

由图 5(b)可得：湖南处理废线路板超过 50%来自于本地。陕西、山西、河南废线路板分别在 2020 年、2021 年、2022 年向湖北转移，且都先增加后减少。根据整体转移趋势可以发现未来废线路板转移地区主要以河南为主。

由图 5(c)可得：重庆处理废线路板主要来自于四川地区且逐年增长，逐渐达到最大处理量后，导致贵州和云南分别在 2024 年、2025 年后停止向重庆转移。陕西由于向湖南和广东转移的原因，到重庆的转移量 2020—2023 年逐渐减少，2023—2030 年先增加后减少。

由图 5(d)可得：江西处理废线路板主要来自福建、江苏、安徽三个地区。2020—2030 年江苏废线路板转移量先增加，2024 年后逐年减少逐渐被安徽替代，安徽转移量整体呈现先减少后逐年增加趋势，2026 年后成为主要转移地区，提供最多废线路板。福建由于同时向广东转移废线路板且随着江西和安徽废线路板的增加，2024 年后不再为江西提供废线路板。

由图 5(e)可得：浙江跨区域回收废线路板主要来自上海、辽宁、江苏。江苏转移量先减少，2026 年后开始增加；上海、辽宁的转移量先增加，2026 年开始逐年减少。浙江未来废线路板来源主要为自身和江苏。

由图 5(f)可得：湖北跨区域回收废线路板主要来自河南、山东、山西、河北、北京、安徽等地。河南转移量在 2024 年之后趋于平稳；山东为主要供应地

区,整体呈现增长趋势;山西由于向湖南转移废线路板,2022 年之后不再向湖北转移;河北转移量呈增长趋势;北京、安徽整体呈下降趋势。

通过模拟改善了企业实际处理量与产能相差较多的现状。相较于废线路板处理地区实际回收废线路板数量,该模拟促进了典型地区废线路板处理企业的发展,同时也为废线路板跨区域回收提供了理论支撑。

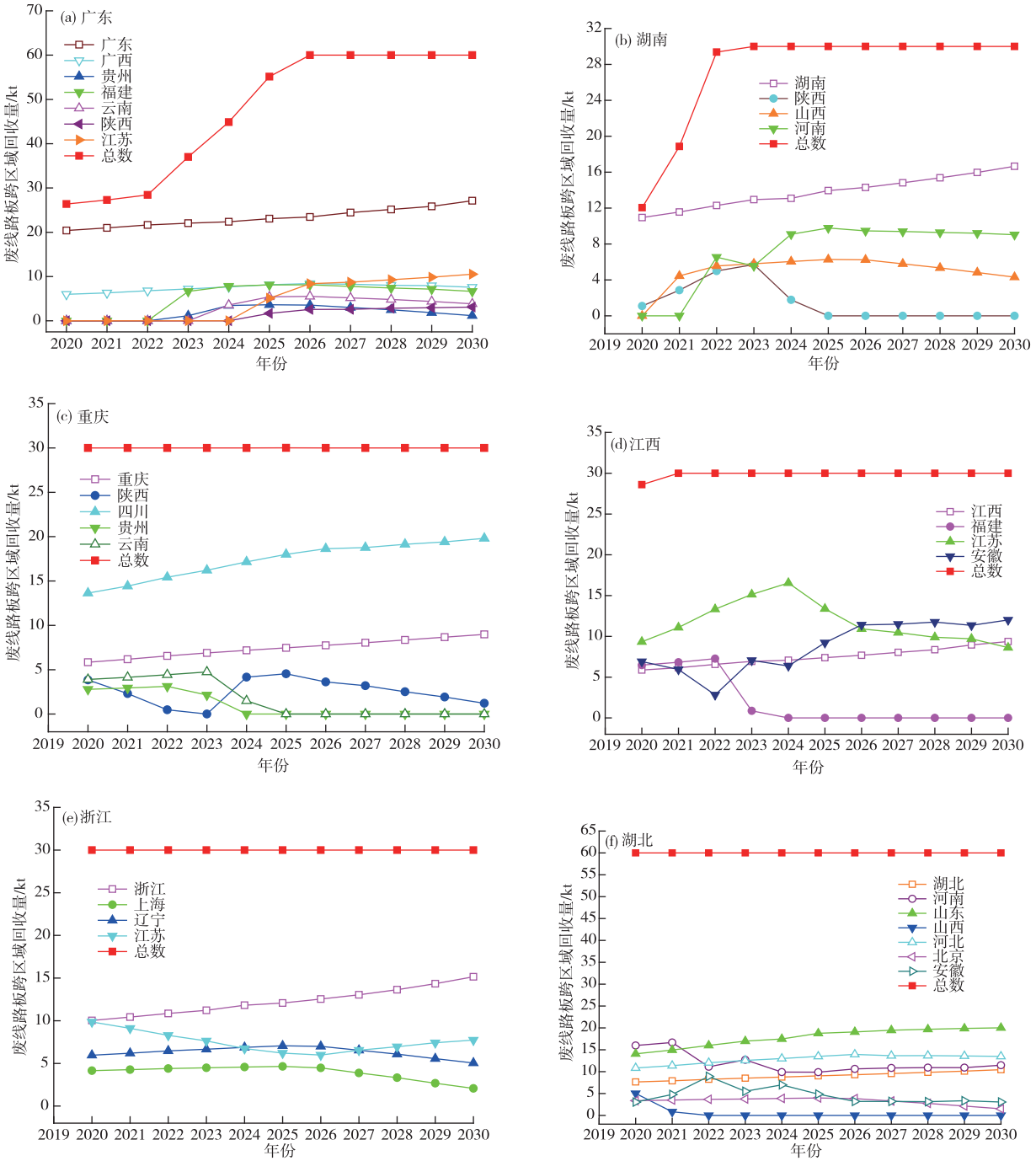

图 5 2020—2030 年典型处理地区废线路板跨区域回收量

Fig. 5 Interregional recycling of waste circuit boards in typical treatment areas from 2020 to 2030

4 回收体系环境影响评价结果

通过 GaBi 软件计算得到 2020 年废线路板分别转移到广东、湖南、重庆、江西、浙江和湖北六个地区的环境影响。2020 年总的全球变暖潜能值(GWP)为(kt CO_2 eq.):广东 0.23、湖南 0.074、重庆 0.76、

江西 0.83、浙江 0.95、湖北 3.0。可以看出，由于湖北在 2020 年时废线路板接收量最大，且跨区域回收较其他 5 个地区多，所以环境影响最大。

基于现有数据，分别计算预测 2020 至 2030 年广东、湖南、重庆、江西、浙江和湖北六个地区各自运输过程中的环境影响，结果如图 6 所示。对于广东来说，江苏到广东的跨区域转移排放量最大。对于湖南来说，陕西排放最少，山西、河南相当。对于重庆来说，四川到重庆排放量最大，但其转移量也最大。对于江西来说，江苏到江西跨区域转移排放量最大，可以看出也是根据转移量的变化先增加而后逐渐减少。对于浙江来说，辽宁到浙江跨区域转移，排放量远大于上海和江苏；对于湖北来说，废线路板跨区域转移到湖北的地区最多，导致其排放量位居第一。

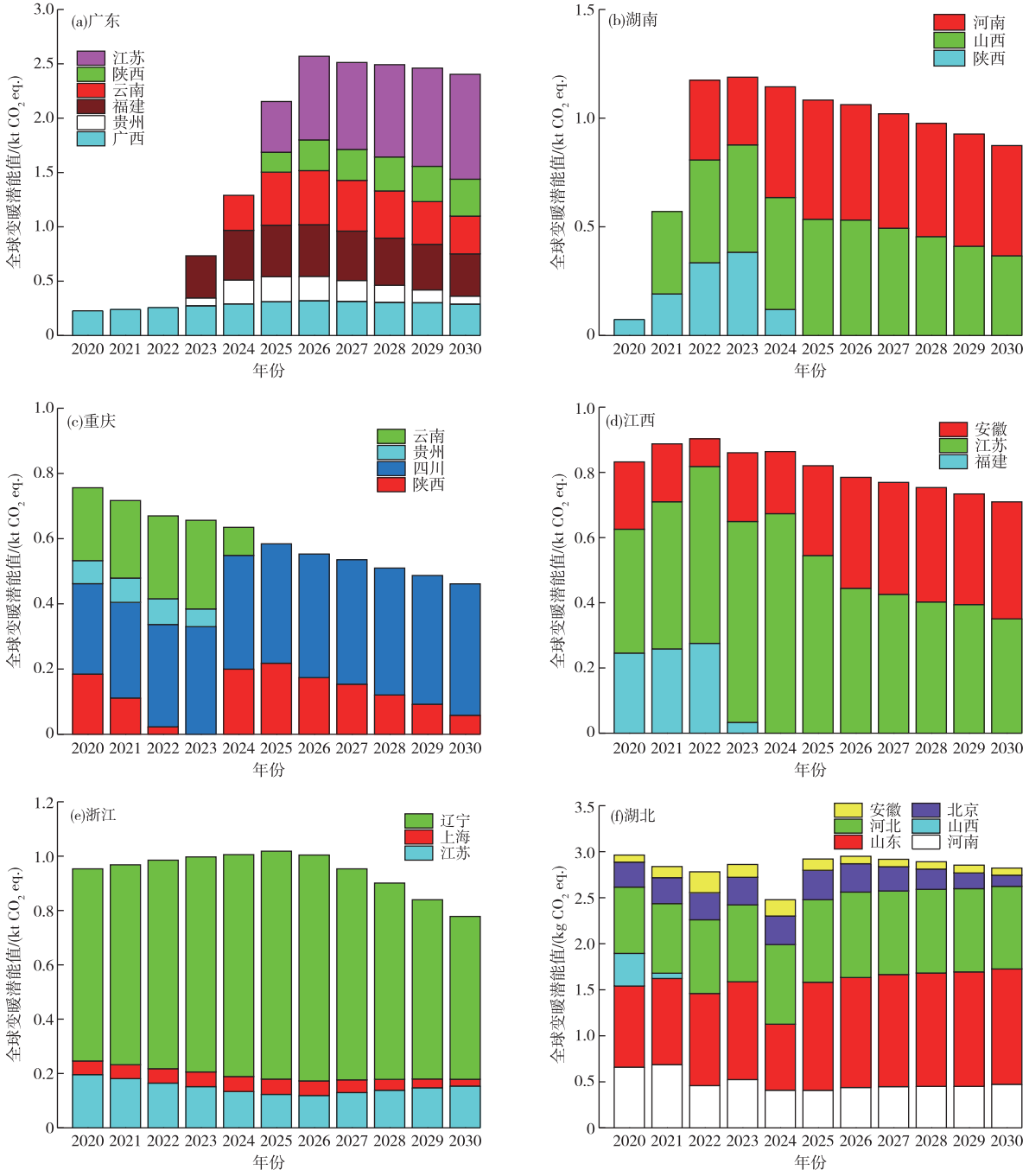

图 6　2020—2030 年典型地区废线路板跨区域运输过程中的环境影响评价

Fig. 6　Environmental impact assessment of interregional transportation of waste circuit boards in typical areas from 2020 to 2030

5 结论及建议

以废线路板为研究目标,分别运用 Stock-based 模型、MDMF 模型计算和模拟了典型地区废线路板数量以及跨区域转移回收处置的流量与流向。且使用环境影响评价方法对 MDMF 模拟结果进行评价。研究结果显示:

1)最优的废线路板处理分配为:广西、贵州、福建、云南、陕西、江苏废线路板转移至广东;陕西、山西、河南废线路板转移至湖南;陕西、四川、云南、贵州的废线路板转移至重庆;安徽、江苏、福建废线路板转移至江西;上海、辽宁、江苏的废线路板转移至浙江;北京、河北、山西、河南、安徽、山东的废线路板转移至湖北。其中废线路板产生量逐年增加,各处理地区未收集到其最大处理量时,跨区域转移数量逐年增加,对于环境的影响也在逐年增加。随着未来典型处理地区废线路板产生量的持续增加,需要跨区域转移收集的数量逐渐减少,转移过程中的环境影响也逐渐降低。

2)对未来的废线路板跨区域收集及处置提出以下两点建议:第一,强化废线路板收集转运等过程监管。在拆解、收集、回收、运输及处置环节,落实相关政策的规范及相关部门的监管。典型地区应认真执行国家危险废物治理方针政策,严格落实废线路板利用处置、污染环境防治及运输安全等方面的监管职责。严厉打击非法收集、贮存、转移、利用、处置废线路板的违法犯罪行为。第二,积极提升各地区废线路板收集及处置能力。加快推进废线路板利用处置工艺提升改造,提高现有设施的运营水平,以此促进全国废线路板更加规范、高效、绿色的资源化。

参考文献

[1] 陈静静,李彬,戴煜,等. 废线路板回收技术的现状分析[J]. 现代化工,2019,39(5):42-46.
CHEN J J, LI B, DAI Y, et al. Status analysis on recycling technology of spent printed circuit board[J]. Modern Chemical Industry,2019,39(5):42-46.

[2] 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[J]. 家用电器,2021(6):68-87.
White paper on WEEE recycling industry in China 2020[J]. Home Appliance,2021(6):68-87.

[3] BEIKI V,NASERI T,MOUSAVI S M. Comprehensive characterization and environmental implications of spent telecommunication printed circuit boards: towards a cleaner and sustainable environment[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: 116482. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116482.

[4] PIETRELLI L, FERRO S, VOCCIANTE M. Eco-friendly and cost-effective strategies for metals recovery from printed circuit boards[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,112:317-323.

[5] 黎敏,李冲,徐小锋,等. 废线路板热解处理技术和装置发展现状[J]. 有色金属(冶炼部分),2019(9):18-27.
LI M,LI C,XU X F,et al. Development status of waste circuit board pyrolysis treatment technology and equipment[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(9):18-27.

[6] 刘晓静,吴玉锋,李彬,等. 废线路板典型利用处置技术污染防控研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(10):71-80.
LIU X J,WU Y F,LI B,et al. Research progress on pollution prevention and control of typical utilization and disposal technology of waste printed circuit boards[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(10): 71-80.

[7] 李江平,陈习堂,舒波,等. 废旧电视电路板的热解研究[J]. 有色金属工程,2021,11(10):130-135.
LI J P,CHEN X T,SHU B,et al. Study on pyrolysis of waste TV circuit board[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021,11(10):130-135.

[8] MIR S,DHAWAN N. A comprehensive review on the recycling of discarded printed circuit boards for resource recovery[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 178: 106027. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106027.

[9] 郝娟娟,王乙舒,吴玉峰,等. 废线路板非金属材料回收利用技术现状与展望[J]. 材料导报,2021,35(7):7001-7012.
HAO J J, WANG Y S, WU Y F, et al. Current situation and prospect of recovery and utilization of nonmetal materials of waste printed circuit board[J]. Materials Reports,2021,35(7):7001-7012.

[10] 李勇,付国燕,丁剑,等. 国内废线路板无害化处置现状及技术进展[J]. 有色冶金节能,2020,36(5):7-9.
LI Y, FU G Y, DING J, et al. Present status and technical progress of harmless disposal of waste circuit board in China [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy,2020,36(5):7-9.

[11] 潘德安,王腾起,顾一帆,等. 典型废旧复合材料循环系统综合绩效评价与政策模拟[J]. 环境保护,2021,49(5):21-28.
PAN D A,WANG T Q,GU Y F,et al. Comprehensive

performance evaluation and policy simulation of typical waste composite recycling system[J]. Environmental Protection,2021,49(5):21-28.

[12] 桑宇,乔鹏,薛军.中国不同区域一般工业固体废物现状及展望[J].现代化工,2022,42(10):11-17.
SANG Y, QIAO P, XUE J. Status and prospect of general industrial solid wastes in China′s different regions[J]. Modern Chemical Industry,2022,42(10):11-17.

[13] 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.

[14] 王琪,杨旸,马红烨.废弃电子产品资源化潜力预测模型研究[J].中国人口·资源与环境,2014,24(11):147-153.
WANG Q,YANG Y,MA H Y. Research on prediction models of electronic waste recycling potential[J]. China Population,Resources and Environment,2014,24(11):147-153.

[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,LYU 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] 王怀栋.我国电子废弃物逆向供应链的优化机制研究[D].北京:北京工业大学,2018.
WANG H D. Optimization mechanism of the reverse supply chain of waste electrical and eletronic equipment in China[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.

[17] 田西.经济与环境双重视角下我国再生铅产业绿色发展研究[D].北京:北京工业大学,2017.
TIAN X. Secondary lead industry green development in China from economy and environment perspectives[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2017.

[18] LI J W, SONG X L, YANG D, et al. Simulating the interprovincial movements of waste mobile phones in China based on the current disassembly capacity[J]. Journal of Cleaner Production,2020,244:118776. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118776.

[19] 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.

[20] YUAN Q B, GU Y F, YANG M, et al. Synergistic utilization mechanism of e-waste in regions with different levels of development:a case study of Guangdong Province[J]. Journal of Cleaner Production,2022,380: 134855. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.134855.

[21] 金栖凤. GaBi 软件在环境影响评价中的应用[D].苏州:苏州科技学院,2015.
JIN X F. GaBi application in the environmental impact assessment[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology,2015.

[22] 李利军,张金宇,李艳丽,等.雄安新区运输工具生命周期环境影响评价研究[J].交通节能与环保,2022,18(4):89-98.
LI L J, ZHANG J Y, LI Y L, et al. Environmental impact assessment of the life cycle of transport vehicles in Xiong′an New Area[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection,2022,18(4):89-98.