

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响
..... 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素
..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星、性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险
..... 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估

陈盼^{1,2}, 施晓清^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 电子废弃物是京津冀区域重要的“城市矿山”之一, 全面系统地评估该地区电子废弃物产生量及其回收利用的资源环境效益, 可为该区域通过电子废弃物协同精准管理来解决资源环境问题提供科学依据和方法支撑. 基于改进的保有量系数法、物料系数法、市场价值法及污染系数法, 通过估算废弃电视、电冰箱、空调、洗衣机和计算机5类主要产品(“四机一脑”)的产生量、资源可回收量、资源回收价值及资源环境效益等, 对2010~2025年京津冀电子废弃物的回收利用潜力及环境效益进行预测和评估. 结果表明, 2010~2025年京津冀废弃“四机一脑”产生量不断增加, 2010~2018年期间年均增长率为7.75%, 此后预计将以年均3.07%的速度递增, 2025年废弃“四机一脑”总量将达到1 861.74万台, 可回收普通金属27.19万t、塑料12.75万t和贵金属19.45 t. 2019~2025年期间, 废弃空调和计算机的资源回收经济价值较高, 二者之和占年回收总价值的77.22%; 铜和金的回收经济价值贡献比分别为43.37%和19.82%, 显著高于其他资源. 预计2025年资源回收总价值达50.24亿元, 是2010年的3.13倍, 其中普通金属、贵金属和塑料的回收价值分别为28.68、13.27和8.29亿元. 若2025年产生的电子废弃物全部被规范回收利用, 能够减少原生矿石开采913.23万t, 减少标准煤利用122.71万t, 减少废水、废气、废渣及重金属排放量分别为1 231.19、473.89、785.10和6.08万t, 减少温室气体排放32.92万t(以CO₂-eq计). 废弃空调的回收利用潜力最大, 但资质处理企业废弃空调回收处理能力亟待提高. 为高效回收利用京津冀电子废弃物, 未来应尽快完善基金补贴制度, 加强对非正规拆解部门的监督与管理, 通过建立区域信息共享平台, 实现电子废弃物全生命周期区域协同管理.

关键词: 电子废弃物(WEEE); 回收利用潜力; 环境效益; 管理策略; 京津冀

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1976-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909249

Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei

CHEN Pan^{1,2}, SHI Xiao-qing^{1*}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Waste electrical and electronic equipment (WEEE or e-waste) is a significant urban mine in the Beijing-Tianjin-Hebei region. A comprehensive and systematic assessment of the amount of e-waste generated in the region and the resources and environmental benefits of e-waste recycling can provide scientific basis and methods to support collaborative and accurate management of e-waste in the region to solve resource and environmental problems. Based on the improved ownership coefficient method, material coefficient method, market value method, and pollution coefficient method, this study predicted and evaluated the recycling potential and environmental benefits of e-waste in Beijing-Tianjin-Hebei from 2010 to 2025 by estimating the production, amount of recyclable resources, resource recycling value, and environmental benefits of waste televisions, refrigerators, air conditioners, washing machines, and computers (five major e-wastes). The results show that the amount of five major e-wastes will increase continuously from 2010 to 2025, with an annual average growth rate of 7.75% during the period of 2010 to 2018, and it is expected to increase at 3.07% after that. In 2025, the amount of the five major e-wastes in Beijing-Tianjin-Hebei will reach $1\ 861.74 \times 10^4$ units, with recycling of ordinary metal, plastic, and precious metal to 27.19×10^4 , 12.75×10^4 , and 19.45 tons, respectively. From 2019 to 2025, the economic value of recycling waste air conditioners and computers will be relatively higher than that of other e-wastes. The sum of the economic value of waste air conditioners and computers is 77.22% of the total annual recycling value. The economic value contribution ratios of copper and gold are 43.37% and 19.82%, respectively, which are significantly higher than that of other resources. It is estimated that the total value of resource recovery in 2025 will reach 5.02 billion yuan, which is 3.13 times that in 2010. Among them, the recovery values of common metals, precious metals, and plastics will be 2.87, 1.33, and 0.83 billion yuan, respectively. If all the five major e-wastes generated in 2025 are recycled in a standardized way, it will reduce the exploitation of primary ores by 913.23×10^4 tons, the utilization of standard coal by 122.71×10^4 tons, the emission of waste water, waste gas, waste residue, and heavy metals by $1\ 231.19 \times 10^4$, 473.89×10^4 , 785.10×10^4 , and 6.08×10^4 tons, respectively, and the emission of greenhouse gases by 32.92×10^4 tons CO₂-eq. Waste air conditioners have the greatest recycling potential, but the recycling capacity of waste air conditioners in processing enterprises needs to be improved urgently. To effectively exploit e-waste in Beijing-Tianjin-Hebei, the fund subsidy system should be improved as soon as possible, the supervision and management of informal dismantling departments should be strengthened, and a regional information sharing platform should be established to realize regional collaborative management of e-waste.

收稿日期: 2019-09-26; 修订日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(71373259); 国家重点研发计划项目(2016YFC0503407)

作者简介: 陈盼(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为产业生态学, E-mail: chenpan926@126.com

* 通信作者, E-mail: shixq@cees.ac.cn

throughout its life cycle.

Key words: waste electrical and electronic equipment (WEEE); recycling potential; environmental benefits; WEEE management; Beijing-Tianjin-Hebei

资源循环利用是推进生态文明建设及促进循环经济发展的重要手段,全面提高各领域与各行业资源循环利用率是缓解资源短缺和环境污染压力的有效途径^[1,2].中国作为电器电子产品的生产与消费大国,废弃电器电子产品年产生量已超过 700 万 t,居世界第一,而被规范收集和处理的量不到 20%,远低于世界先进水平^[3].废弃电器电子产品(电子废弃物),含有铜、铝、铁、金、银、钯和塑料等数十种可回收资源,是重要的“城市矿山”,具有极高的资源回收利用价值^[4~7].同时,电子废弃物含重金属和有机污染物,处理不当会给区域环境和人体健康造成严重影响^[8~12].为鼓励电子废弃物资源化利用,我国政府共批复 109 家废弃电器电子产品处理基金补贴企业,企业年设计处理能力超过 1.5 亿台.但受利益驱动及基金亏空影响,目前约 80% 的电子废弃物仍流向非正规回收部门,正规企业实际回收处理量不到设计能力的 50%,企业产能过剩,电子废弃物规范回收处理率偏低^[13,14].究其原因主要是缺少对各地电子废弃物产生量的准确估算及其资源可回收量和经济环境效益等基础信息的定量评估.因此,提高各地电子废弃物产生量估算精度,定量评估电子废弃物回收利用的经济效益和环境效益,将有助于管理者合理规划各地企业生产规模,完善基金补贴制度及电子废弃物回收利用体系,并增加人们对电子废弃物资源化利用的认识和积极性.

国外学者 Tran 等^[15]、Abbondanza 等^[16]、Imran 等^[17]及 Parajul 等^[18]分别基于物质流分析、市场供给模型、时间序列模型和相关方调研对越南、巴西、巴基斯坦和丹麦电子废弃物产生量及其中所含金属和塑料等资源可回收量进行测算.国内学者 Duan 等^[19]、Zeng 等^[20]和 Tan 等^[21]分别通过销售废弃模型、市场供给 A 模型和物质流分析量化了中国各类电子废弃物的产生量及资源可回收量,Cao 等^[22]、Gu 等^[23]和郭晓倩等^[24]分别基于市场供给模型、斯坦福模型和消费使用模型对浙江省、北京市和天津市电子废弃物报废量进行测算.Xue 等^[25]、Rocchetti 等^[26]、Alcántara-Concepción 等^[27]、Song 等^[28]及 Menikpura 等^[29]分别基于生命周期分析方法量化了废弃印刷电路板(PCB)、阴极射线管显示器(CRT)、电脑、电视及 4 种家用电器回收利用产生的环境效益.可见,现有研究多侧重于国家、省和市尺度电子废弃物产生量的测算,较少涉及城市群层面各类电

子废弃物产生量、资源可回收量、资源回收经济及环境效益的综合评估.

有研究表明电子废弃物回收利用过程存在明显的跨地区活动,区域协同管理能够有效促进电子废弃物区域流动,提高区域整体回收利用率,进而降低生态环境风险,促进区域可持续发展^[30].京津冀地区是我国重要的经济发展中心,2017 年区域生产总值占全国的 10%,但由于空气质量排名靠后,成为我国环境治理的重点监管区域.该地区常住人口 1.1 亿,电器电子产品报废量及报废密度均处于全国较高水平^[31].受基金补贴制度不完善及非正规回收处理部门竞争等因素影响,大量电子废弃物流入非正规回收处理部门,简单和粗暴的非规范拆解方式不仅给区域环境带来新的压力,也制约了区域资源循环利用.《京津冀协同发展规划纲要》的实施,为区域资源循环利用提供了政策指导,也为探索区域电子废弃物回收利用协同发展提供了新模式.开展京津冀地区电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估,能够为政府制定合理的政策与规划,以及电子废弃物资质处理企业的发展提供科学依据,也是实现区域电子废弃物协同高效管理的前提与基础.为此,本文通过对不同地区及产品类型设置不同的报废系数,提出改进的保有量系数法,来提高电子废弃物产生量估算准确性,并通过电子废弃物资源回收量、资源回收价值和资源环境效益等指标预测并定量评估京津冀地区 2010~2025 年主要电子废弃物的资源回收利用潜力和环境效益.在此基础上,提出区域电子废弃物资源化协同管理策略,以期为提高区域电子废弃物回收利用率提供科学依据及方法支撑.

1 材料与方法

1.1 研究对象

2015 年我国将废弃电器电子产品从传统的“四机一脑”,即电视、电冰箱、空调、洗衣机和计算机等 5 大类,扩大到 14 类,新增了电热水器、燃气热水器、吸油烟机、打印机、复印机、传真机、监视器、移动通信手持机和电话单机等 9 类产品^[32].有研究表明,“四机一脑”5 类产品的年报废重量占比超过 70%,资源可回收量高于其他产品^[20].目前电子废弃物资质处理企业以“四机一脑”拆解为主,较少涉及新增品类.因此,本研究以家庭及组织机构产生的“四机一脑”5 类产品为主要评估对象,对京津冀地

区 2010~2025 年电子废弃物资源回收利用潜力及环境效益进行量化分析,为区域电子废弃物回收利用协同管理提供数据支撑和方法参考。

1.2 电子废弃物产生量估算方法

基于相关调研,对 8 种常用电子废弃物产生量评估方法的数据要求及其优缺点进行总结和比较,具体见表 1。由于区域电器电子产品的销售数据较

难获得,而社会保有量数据可由统计年鉴获得,且“消费与使用模型”忽略了科技进步和人们要求提高引起的平均使用寿命变化。综合来看,保有量系数法的数据来源可靠且可追踪,其测算结果更符合区域电子废弃物的实际产生情况^[33,34]。因此,本文选择保有量系数法对京津冀地区废弃“四机一脑”产生量进行测算。

表 1 电子废弃物产生量估算方法比较

Table 1 Comparison of estimation methods of e-waste amount

方法	数据需求	优点	缺点
市场供给模型	销售量、产品平均使用寿命	参数少,简单易用	未考虑科技进步和经济发展引起的产品平均使用寿命变化
市场供给 A 模型	销售量、产品寿命分布	更符合实际	寿命分布函数不易确定
斯坦福模型	销售量、产品寿命分布	更符合实际	寿命分布函数不易确定
卡内基梅隆模型	销售量、产品废弃后不同处置方式的比例	考虑了处置方式对报废量的影响	弃后的处理处置方式及其比例不易确定
时间梯度模型	销售量、社会保有量	参数少,简单易用	初始年份数据较难获得
饱和市场模型	销售量、市场饱和和因子	参数少,简单易用	市场饱和和因子较难确定
消费与使用模型	社会保有量、产品平均使用寿命	参数少,简单易用,适合区域尺度	未考虑科技进步和经济发展引起的产品平均使用寿命的变化
保有量系数法	社会保有量、产品报废高峰年限、产品报废系数	简单易用,适合区域尺度	报废系数依靠经验数据,增加了结果的不确定性

保有量系数法假设电器电子产品都有一定的使用年限,使用第 m 至第 n 年的 $(n-m+1)$ 年为报废高峰期,在报废高峰期内产品每年的报废概率相同,则第 $t+m$ 年居民家庭报废量 P_{t+m} 可表示为:

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

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

式中, P_{t+m} 为第 $t+m$ 年居民家庭电器电子产品报废量,单位:台。 H_t 为第 t 年时电器电子产品的社会保有量,单位:台。 n 为产品的最长使用寿命, $m < n$,其中洗衣机、电冰箱、电视和空调使用第 10~16 年为报废高峰期,计算机使用第 4~6 年为报废高峰期^[33,35]。 θ 为产品在第 $t+m$ 至第 $t+n$ 年报废量占第 t 年时社会保有量的比例,又称报废系数。 H_t^u 和 H_t^r 分别为第 t 年时城镇和农村居民每百户家庭拥有电器电子产品的数量,单位:台·(100 户)⁻¹。 N_t^u 和 N_t^r 分别为城镇和农村居民总户数,单位:户, H_t^u 、 N_t^u 、 H_t^r 和 N_t^r 均源于各地统计年鉴。

已有研究中报废系数 θ 一般取固定值,忽略了地区经济发展与居民家庭消费水平差异对报废系数的影响。因此,可通过对不同地区及产品类型设置不同的报废系数改进现有方法,来提高京津冀地区电子废弃物产生量估算结果的准确性。改进的保有量系数法中,第 $t+m$ 年居民家庭报废量 P_{t+m} 可表示为:

$$P_{t+m} = \frac{H_t^u \times N_t^u \times \theta^u}{100(n - m + 1)} + \frac{H_t^r \times N_t^r \times \theta^r}{100(n - m + 1)} \quad (3)$$

式中, θ^u 和 θ^r 分别为城镇和农村的产品报废系数。

由于近年来电视显示技术革新,液晶电视逐步代替阴极射线管显示器(CRT)电视,黑白电视已接近全部淘汰,因此将各地黑白电视的报废系数设为 100%。

除黑白电视机外,参考文献[33,35]及专家意见,考虑地区之间、城镇与农村之间经济发展与居民消费水平的差异,将北京及天津城镇其他产品的报废系数设为 60%,北京、天津农村及河北城镇设为 50%,河北农村设为 40%。

电子废弃物来源包括居民家庭和组织机构两部分,中国家电研究院研究表明组织机构电子废弃物产生量与居民家庭电子废弃物产生量存在一定比例,由此第 $t+m$ 年某类产品报废总量 Q_{t+m} 可表示为:

$$Q_{t+m} = P_{t+m} \times (\alpha + 1) \quad (4)$$

式中, Q_{t+m} 为第 $t+m$ 年某类产品报废总数量,单位:台。 α 为组织机构某类产品废弃量占居民家庭废弃量的比例,其中电视设为 5%,洗衣机和电冰箱均设为 2%,废弃空调和计算机均设为 30%^[33]。

1.3 电子废弃物资源可回收量及价值估算方法

假设电子废弃物中所含资源能够被 100% 回收利用,根据物料系数及市场价值法第 $t+m$ 年电子废弃物中 j 资源的可回收量 R_{t+m}^j 和 E_{t+m}^j 价值可表示为:

$$R_{t+m}^j = \sum_{i=1}^5 Q_{t+m}^i \times w_i \times \rho_{ij} \quad (5)$$

$$E_{t+m}^j = R_{t+m}^j \times \delta_j \quad (6)$$

另外,为比较各类废弃产品的资源回收价值,利

用公式(7)计算第 $t+m$ 年 i 产品中各种资源的回价值 S_{t+m}^i .

$$S_{t+m}^i = Q_{t+m}^i \times w_i \times \sum_{j=1}^7 (\rho_{ij} \times \delta_j) \quad (7)$$

公式(5)~(7)中, R_{t+m}^j 为第 $t+m$ 年“四机一脑”中 j 资源的可回收总量, 单位: kg. Q_{t+m}^i 为第 $t+m$ 年 i 产品的报废总数量, 单位: 台. E_{t+m}^j 为第 $t+m$ 年“四机一脑”中 j 资源的可回收总价值, 单位: 元. S_{t+m}^i 为第 $t+m$ 年 i 产品中各种资源的可回收总价值, 单位: 元. ρ_{ij} 为 i 产品中 j 资源的平均含量, 单位: %. w_i 为 i 类产品的平均重量, 单位: kg·台⁻¹. δ_j 为 j 资源的 2018 年的平均价格, 单位: 元·kg⁻¹. i 为电子废弃物的产品类型: 洗衣机、冰箱、空调、电

视、计算机. j 为资源的类型: 铜、铝、铁、金、银、钯、塑料.

表 2 统计了各类电子废弃物的平均重量、资源平均含量及资源价格. 其中, 各类电子废弃物的平均重量、普通金属和塑料含量为 2018 年天津某家电子废弃物资处理企业调研数据, 贵金属含量参考文献[20]. 普通金属和塑料的价格来自中国再生资源回收利用协会, 贵金属的价格来自伦敦金属交易所, 各类资源的价格均为 2018 年平均值. 受数据及方法限制, 为量化并比较 2010~2025 年京津冀地区电子废弃物资源回收利用经济效益, 采用 2018 年资源平均价格对历年资源价值进行估算.

表 2 各类电子废弃物平均重量及其资源平均含量和价格

项目	平均重量 /kg·台 ⁻¹	普通金属含量/%			贵金属质量分数			塑料质量分数
		铜(Cu)	铝(Al)	铁(Fe)	金(Au)	银(Ag)	钯(Pd)	/%
洗衣机	23.47	4.00	3.00	53.00	0	0	0	26.00
冰箱	40.09	3.40	1.10	50.00	0	0	0	43.30
空调	52.38	18.50	7.00	45.90	0	0	0	17.50
电视	20.00	3.00	2.00	10.00	1.40×10^{-6}	1.96×10^{-5}	0.7×10^{-6}	23.00
计算机	10.00	6.47	2.83	21.30	4.60×10^{-5}	2.32×10^{-4}	2.08×10^{-5}	23.00
资源平均价格/元·kg ⁻¹	—	45.00	9.50	2.00	3.20×10^5	4.00×10^3	2.70×10^5	6.50

1.4 电子废弃物资源环境效益估算方法

电子废弃物回收利用能够减少原生矿的开采、节约能源、减少污染物及温室气体排放, 产生良好的资源环境效益, 表 3 统计了回收利用 1 t 电子废弃物产生的各项资源环境效益. 从中可知, 矿石、标准煤、废水、废气和废渣数据来源于商务部公开数据[36]. 重金属包括铅、汞、镉、铬和砷, 是电子废弃物拆解产物废弃印刷电路板中的主要污染物. 根据天津某家电子废弃物资处理企

业调研数据, 得到各类电子废弃物中废弃印刷电路板的质量占比, 并结合 Lu 等[37]的研究中废弃印刷电路板中各种重金属的含量, 计算出回收利用 1 t 各类电子废弃物减少的重金属排放量. 结合 Menikpura 等[29]的研究中单台电子废弃物回收利用减少的温室气体(以 CO₂-eq 计)排放量和表 2 中各类电子废弃物的平均重量, 计算出回收利用 1 t 各类电子废弃物减少的温室气体(以 CO₂-eq 计)排放量.

表 3 1 t 电子废弃物回收利用的资源环境效益清单

产品类型	节约原材料或能源/t		减少污染物/t				减少温室气体 (以 CO ₂ -eq 计)/t
	矿石	标准煤	废水	废气	废渣	重金属	
洗衣机	6.20	1.04	18.25	6.77	6.55	0.01	0.55
冰箱	15.00	2.27	23.40	10.58	13.90	0.002 4	0.47
空调	26.20	3.21	29.50	10.31	21.10	0.007 2	1.06
电视	9.19	1.38	16.32	7.82	8.48	0.48	0.13
计算机	18.30	2.71	24.58	8.87	16.98	0.44	0.26

假设电子废弃物 100% 被规范回收利用, 则根据清单分析和污染系数法第 $t+m$ 年 i 产品回收利用产生的某项资源环境效益 B_{t+m}^i 可表示为:

$$B_{t+m}^i = Q_{t+m}^i \times w_i \times \varphi \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中, B_{t+m}^i 为第 $t+m$ 年 i 产品回收利用产生的某项资源环境效益, 单位: t. Q_{t+m}^i 为第 $t+m$ 年 i 产品的报废总量, 单位: 台. w_i 为 i 类产品的平均重量, 单

位: kg·台⁻¹. φ 为回收利用 1 t 产品 i 产生的各项资源环境效益, 单位: t.

2 结果与讨论

2.1 产生量评估

根据京津冀各地统计数据, 得到 2000~2017 年京津冀地区“四机一脑”的居民家庭保有量, 如图 1

所示. 总体来看,京津冀地区“四机一脑”的家庭保有量不断增加,2017年洗衣机、冰箱、空调、计算机和电视分别为3716.83、3708.21、4494.18、2693.41和4442.78万台,分别是2000年的1.97、2.71、7.61、14.29和1.49倍.2010年前,电视保有量显著高于其他产品;2010年后,洗衣机、电视和电冰箱的家庭保有量增速减缓,且洗衣机和电冰箱保有量十分接近.而受温室效应影响,空调需求量增加,家庭保有量呈显著上升趋势,2017年其保有量已超过电视,且高于其他产品.

结合2010~2017年京津冀“四机一脑”保有量估算结果,基于改进的保有量系数法得到废弃“四机一脑”产生情况,如图2所示.其中,2023~2025年废弃电脑数据为其2010~2022年产生量的多项式拟合结果.图2(a)可看出,2010~2025年京津冀地区“四机一脑”报废量总体呈上升趋势,其中2010~2018年期间年平均增长率为7.75%,2019~2025年期间年均3.07%的速度递增,增速明显低于2010~2018年.2025年京津冀地区“四机一脑”报废总量达1800万台,是2010年的2.2倍.图2(b)产品报废重量上看,2010~2018年京津冀地区平均每年报废“四机一脑”27.82万t,预计2019~2025年期

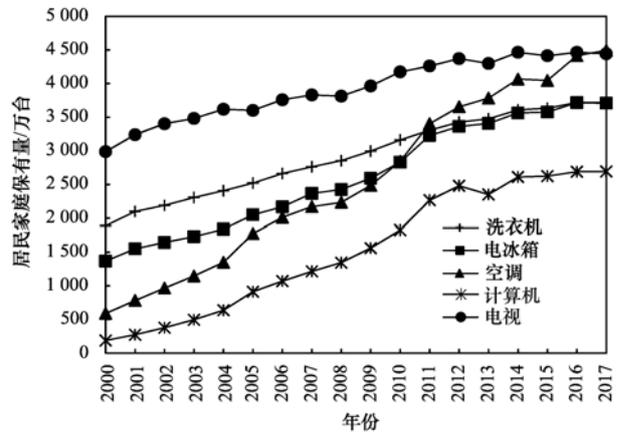
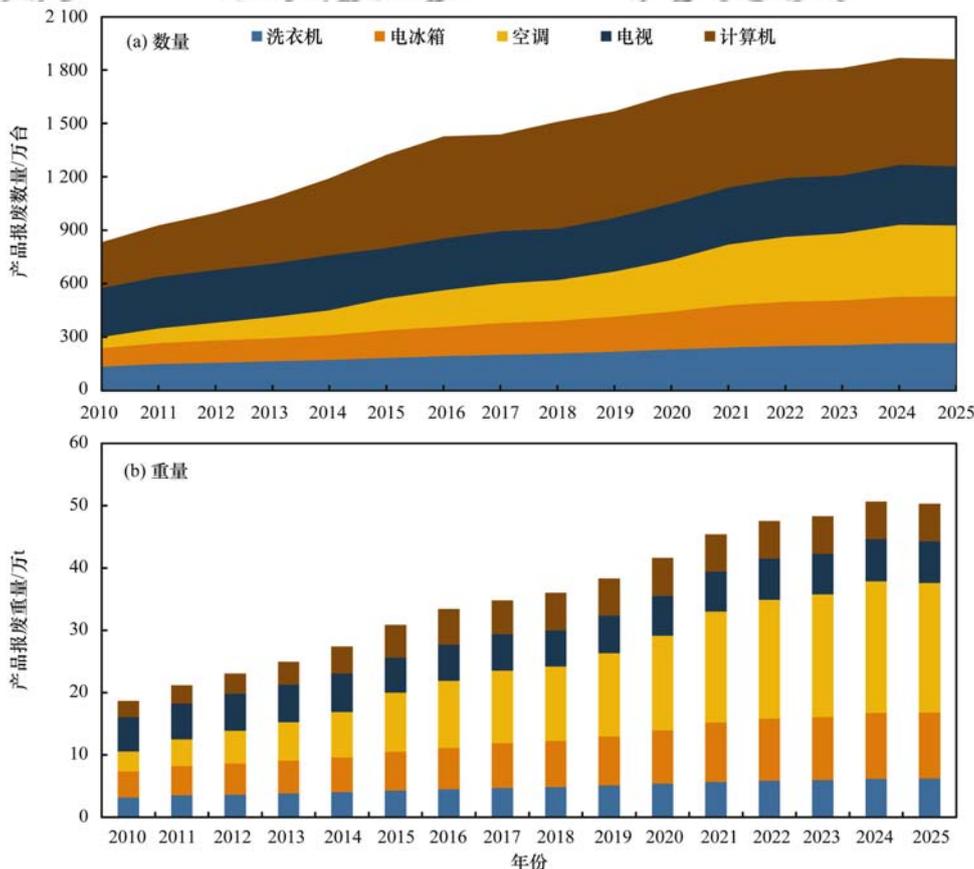


图1 2000~2017年京津冀“四机一脑”居民家庭保有量

Fig. 1 Number of household possess five major electrical and electronic products in Beijing-Tianjin-Hebei from 2000 to 2017

间平均每年报废量达46.01万t,约4.18 kg·人⁻¹.2019~2025年期间空调年报废重量最大,约占报废总量的40%,其次为冰箱,约占报废总量的40%.

图3反映了2010、2015、2020及2025年废弃“四机一脑”报废数量占比及变化情况.可看出,洗衣机和电冰箱报废数量占比相对稳定,均占14%左右;而空调占比不断增加,从2010年的7%增加到2025年的21%,成为今后需要特别监管的电子废弃



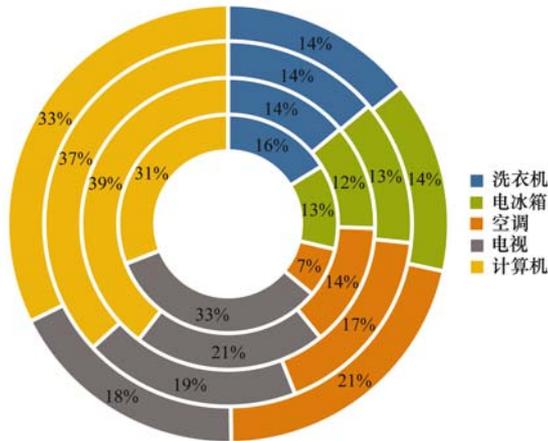
2023~2025年废弃电脑数据为2010~2022年废弃电脑产生量的多项式拟合结果

图2 2010~2025年京津冀废弃“四机一脑”产生数量及重量

Fig. 2 Quantity and weight of five major e-wastes generated in Beijing-Tianjin-Hebei from 2010 to 2025

物类别。

表 4 对比了本研究估算结果与已有研究估算结果的差异,可看出交叉验证误差均在 5% 以内,表明本研究估算结果可靠性较高。



从内到外依次为 2010、2015、2020 及 2025 年废弃“四机一脑”报废数量占比

图 3 2010、2015、2020 及 2025 年京津冀废弃“四机一脑”数量百分比

Fig. 3 Percentage of five major e-wastes in Beijing-Tianjin-Hebei in 2010, 2015, 2020, and 2025

表 4 京津冀废弃“四机一脑”产生量结果验证

Table 4 Verification of the results of five major e-wastes generated in Beijing-Tianjin-Hebei

项目	京津冀(2016 年)	天津(2014 年)
本研究估算值/万台	1 427.04	213.12
文献估算值/万台	1 459.6 ^[31]	213.93 ^[38]
绝对误差/%	2.23	0.38

2.2 资源可回收量及其经济价值评估

基于公式(5)~(7)求得 2010~2025 年京津冀地区废弃“四机一脑”的资源可回收量及经济价值,如图 4~6 所示。图 4 看出,2010~2018 年期间,铁、塑料和银的可回收量不断增加,其他资源增长不明显;2019~2025 年期间,只有铁和塑料增长较明显。这是因为“四机一脑”中铁和塑料的含量都较高,故铁和塑料的可回收量将随着“四机一脑”报废量增加而增加。贵金属主要存在于电视和计算机中,2019~2025 年期间二者报废量变化较小,故贵金属可回收量也基本维持不变。预计 2025 年可回收铜、铝和铁分别为 5.04、2.06 和 20.08 万 t,塑料 12.75 万 t,金、银和钯分别为 2.86、15.28 和 1.30 t。

图 5 显示了各类资源的经济价值贡献比。可看出,2010~2025 年京津冀地区废弃“四机一脑”可回收资源中,铜的经济价值贡献比最高,且其贡献比不断增加,预计 2025 年达到 45.18%。金的贡献比

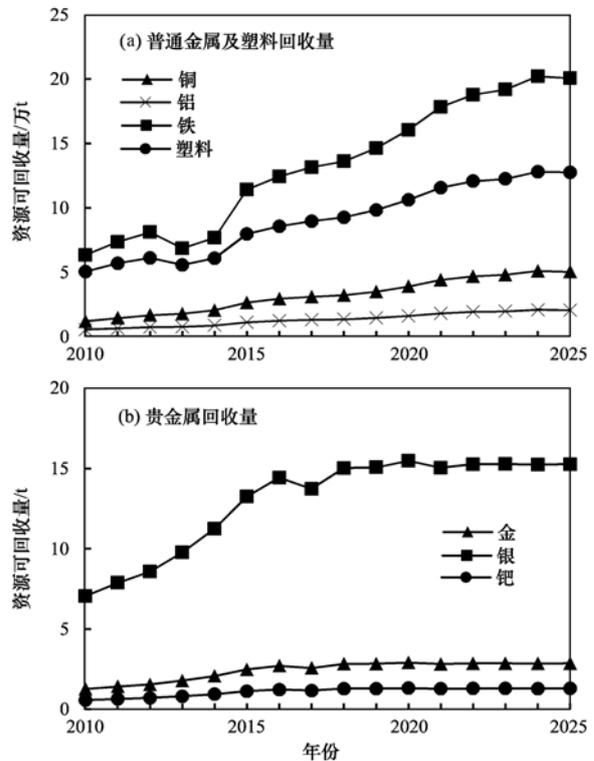


图 4 2010~2025 年京津冀废弃“四机一脑”中资源可回收量

Fig. 4 Amount of five major e-wastes resource recovery in Beijing-Tianjin-Hebei from 2010 to 2025

仅次于铜,但 2019~2025 年期间呈不断下降趋势。银的贡献比最低,2019~2025 年期间维持在 1.32% 左右。预计 2025 年普通金属、贵金属和塑料的回收价值分别为 28.68、13.27 和 8.29 亿元。企业调研发现,由于贵金属资源的回收利用需要投入更多技术和环保成本,目前电子废弃物资质处理企业仍以回收普通金属和塑料为主,拆解下来的废弃印刷电路板一般交给专业处理企业进行贵金属的提取。综合得出,现有技术条件下,电子废弃物资质处理企业回收利用铜和塑料比回收其他资源在经济效益上有一定的比较优势。

由图 6 看出,2010~2025 年京津冀地区废弃“四机一脑”资源回收价值不断增加。其中,废弃空调和计算机资源回收的经济价值较高,电视最低。预计 2025 年,废弃“四机一脑”资源回收总价值达 50.24 亿元,是 2010 年的 3.13 倍。其中,废弃空调和计算机的资源回收价值分别为 22.96 亿元和 15.87 亿元,分别是废弃电视的 8.72 倍和 6.03 倍,二者之和占废弃“四机一脑”资源回收总价值的 77.29%。可见,未来几年废弃空调和计算机将成为电子废弃物回收利用行业的主要经济效益来源。

近年来,随着我国资源约束趋紧,国内资源供给相对不足,各类资源价格总体呈上升趋势^[39]。采用 2018 年资源平均价格对 2010~2025 年电子废

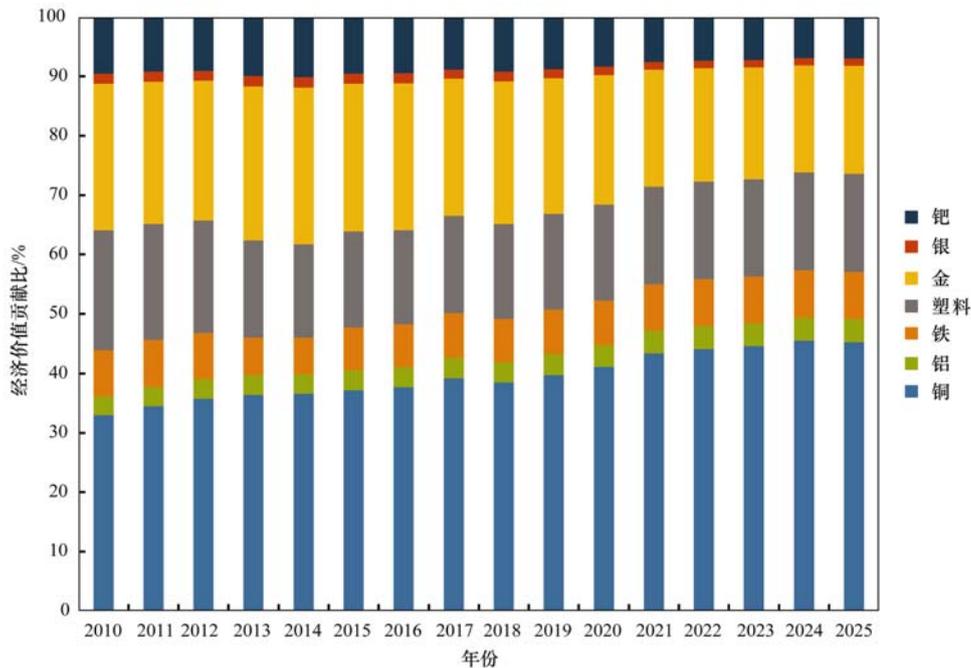


图 5 2010 ~ 2025 年京津冀废弃“四机一脑”可回收资源的经济价值贡献

Fig. 5 Economic value contribution of recoverable resources in five major e-wastes in Beijing-Tianjin-Hebei from 2010 to 2025

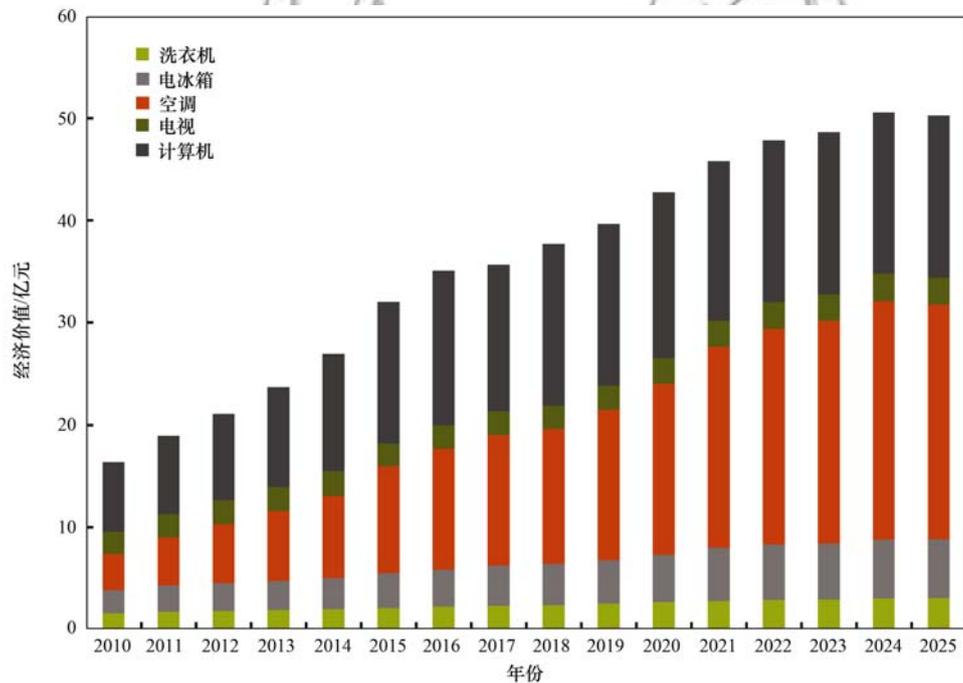


图 6 2010 ~ 2025 年京津冀废弃“四机一脑”资源回收经济价值

Fig. 6 Economic value of five major e-wastes resource recovery in Beijing-Tianjin-Hebei from 2010 to 2025

弃物资源经济价值进行估算,会导致 2010 ~ 2017 年估算结果比实际略高,而 2019 ~ 2025 年估算结果偏低. 因此,未来京津冀电子废弃物资源回收利用会产生更高的经济价值,应尽快提高区域电子废弃物资源回收利用率. 另外,未来研究可在数据支撑条件下,通过各类资源历史价格趋势分析基础上,对 2019 ~ 2025 年各类资源价格进行预测与量化,来完善电子废弃物回收利用资源经济价值的预测与评估.

2.3 资源环境效益评估

基于污染系数法和表 3 回收利用 1 t 电子废弃物的资源环境清单数据,以 2025 年为例,得出京津冀地区主要电子废弃物回收利用产生的资源环境效益,具体见表 5. 比较废弃“四机一脑”回收利用的资源环境效益发现,空调的资源环境效益最高,其减少温室气体排放分别是洗衣机、冰箱、电视和电脑的 6.38、4.43、25.67 和 14.10 倍. 洗衣机节约原材料最少,电视减少温室气体排放最少. 若 2025 年京津

冀地区废弃“四机一脑”全被回收利用,能够减少原生矿石开采量 913.23 万 t,减少标准煤使用 122.71 万 t,相当于北京市 2015 年能源消费总量的 1.68%;同时,可以减少废水、废气、废渣及重金属排放量分别为 1 231.19、474.89、785.10 和 6.08 万 t;减少温室气体排放 32.92 万 t(以 CO₂-eq 计),约占京津冀 2015 年能源碳排放的 0.10%^[40]。综合得出,电子废

弃物回收利用能产生巨大的资源环境效益,有助于区域实现更高的节能减排目标。

上述分析发现,未来几年京津冀地区空调保有量将持续增加,废弃空调产生量增速最快,对其进行回收利用能够产生更高的经济环境效益。然而,文献[41]表明我国废弃电器电子产品处理企业废弃空调的处理能力仅占总处理能力的 5%,2017 年前,每

表 5 2025 年京津冀废弃“四机一脑”回收利用资源环境效益

Table 5 Resources and environmental benefits of recycling five major e-wastes in Beijing-Tianjin-Hebei in 2025

产品类型	节约原材料或能源/t		减少污染物/t				减少温室气体 (以 CO ₂ -eq 计)/t
	矿石	标准煤	废水	废气	废渣	重金属	
洗衣机	38.76	6.50	114.08	42.32	40.94	0.06	3.46
冰箱	158.40	23.97	247.11	111.73	146.79	0.03	4.98
空调	544.69	66.73	613.29	214.34	438.66	0.15	22.06
电视	61.26	9.20	108.78	52.12	56.52	3.20	0.86
计算机	110.13	16.31	147.93	53.38	102.19	2.65	1.56
合计	913.23	122.71	1231.19	473.89	785.10	6.08	32.92

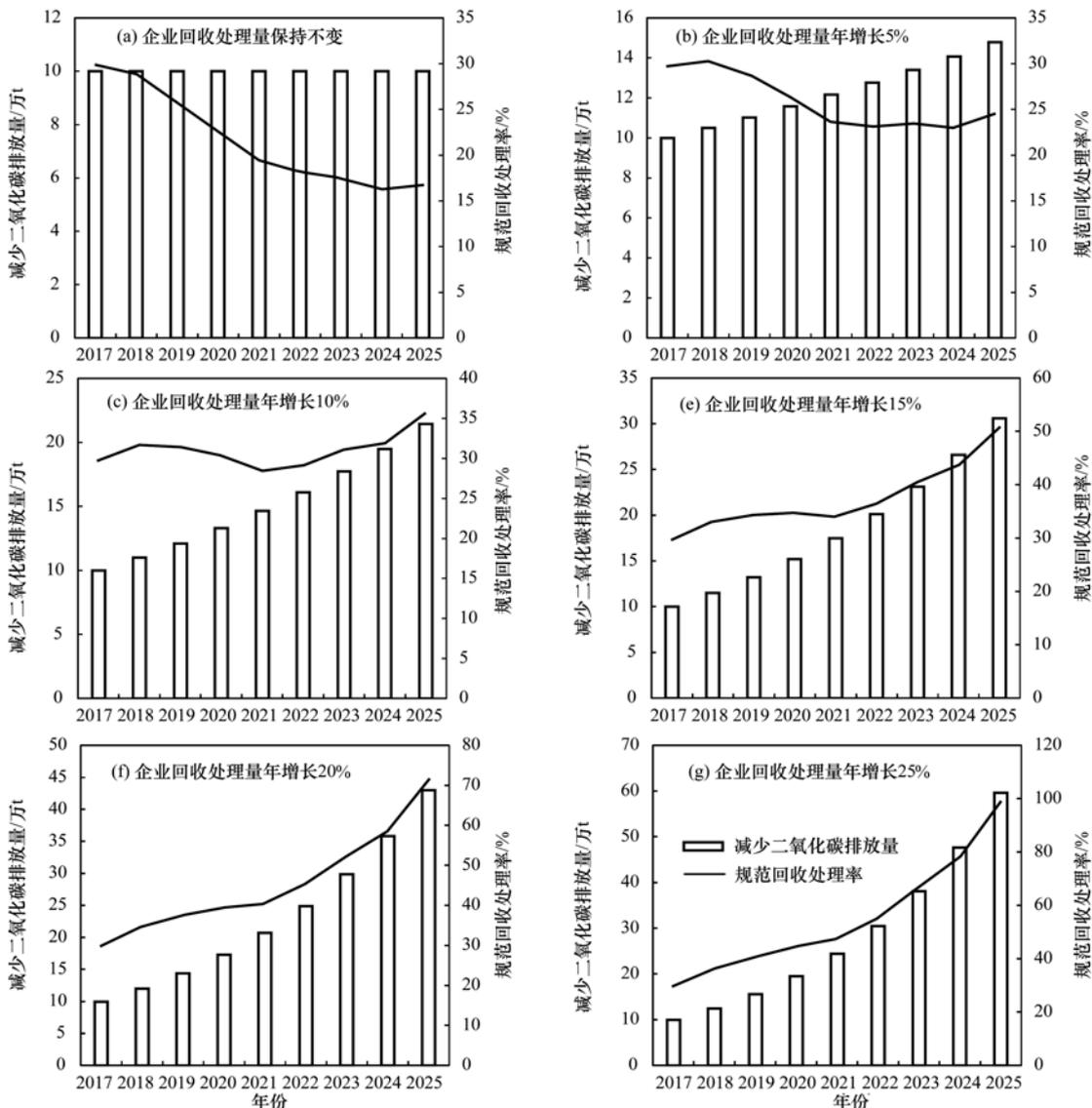


图 7 2017 ~ 2025 年不同情景下废弃空调回收处理的碳减排效益及规范回收处理率

Fig. 7 Benefits of carbon emission reduction and normal recycling rate of waste air conditioners under different scenarios from 2017 to 2025

年废弃空调的规范回收处理量不到产生量的 10%。统计数据表明,京津冀地区处理企业 2017 年共回收处理废弃空调 66.09 万台,占区域废弃空调产生量的 30%。废弃空调的非规范拆解会造成氟氯昂等制冷剂泄漏,加剧臭氧层破坏和全球变暖。氟里昂-22 (R22) 制冷剂在空调中应用最广泛,其全球变暖潜能值(GWP)为 1760^[42]。天津市某废弃电器电子产品处理企业调研结果表明,1 t 废弃空调中含制冷剂 1.70 kg,若均按照 R22 的 GWP 计算,可得到 1 t 废弃空调因非规范拆解造成的制冷剂泄漏相当于释放二氧化碳 2.89 t。

定义企业回收处理量占区域废弃产品产生量的比例为废弃产品的规范回收处理率,以废弃空调制冷剂回收为例,通过情景分析研究了规范回收处理率与资源环境效益的关系。图 7 显示了不同情景下 2017~2025 年京津冀废弃空调的规范回收处理率和制冷剂规范回收减少的二氧化碳排放当量。可看出,若企业回收处理量维持 2017 年水平,每年将减少二氧化碳排放 10 万 t,随着废弃空调产生量增加,其规范回收处理率将不断降低;企业回收处理量年增长率为 5% 时,到 2025 年将累计减少 110.32 万 t CO₂,规范回收处理率下降趋势减缓;企业回收处理量年增长率为 10% 时,废弃空调增加量与企业处理增加量相当,因此规范回收处理率变化较小,维持在 30%~35% 左右,到 2025 年将累计减少 141.67 万 t CO₂;企业回收处理量年增长率为 15% 时,规范回收处理率不断提高,且能够实现我国政府提出的 2025 年电子废弃物规范回收处理率平均达到 50%^[43] 的目标,到 2025 年将累计减少 202.17 万 t CO₂;企业回收处理量年增长率为 20% 和 25% 时,规范回收处理率显著增加,2025 年分别达 80% 和 100%,到 2025 年将分别累计减少 284.17 和 393.93 万 t CO₂。综合得出,规范回收处理率越高,产生的资源环境效益越高。为提高废弃空调的规范回收处理率,实现 2025 年政府规划的规范回收处理目标,未来几年资质处理企业废弃空调回收处理量年增长率至少达到 15%。

3 结论

(1) 2010~2025 年京津冀“四机一脑”报废量不断增加,2010~2018 年期间年平均增长率为 7.75%,此后将以年均 3.07% 的速度递增,预计年平均产生量达 46.01 万 t,约 4.18 kg·人⁻¹,2025 年总数将达到 1 861.74 万台。其中,废弃计算机数量占比最大,废弃空调重量占比最高,产生量增速最快。

(2) 2010~2025 年京津冀地区废弃“四机一

脑”可回收资源中,铜的经济价值贡献比最高,其次是金,银的贡献比最低。预计 2025 年京津冀废弃“四机一脑”中可回收铜、铝、铁和塑料分别为 5.04、2.06、20.08 和 12.75 万 t,金、银和钯分别为 2.86、15.28 和 1.30 t,各种资源总经济价值达 50.24 亿元,是 2010 年的 3 倍。其中,普通金属、贵金属和塑料的回收价值分别为 28.68、13.27 和 8.29 亿元。废弃空调的资源回收价值最高,达 22.96 亿元,占废弃“四机一脑”资源回收总价值的 45.71%。

(3) 若 2025 年京津冀地区废弃“四机一脑”全部被规范回收利用,能够减少原生矿石开采 913.23 万 t,减少标准煤利用 122.71 万 t,减少废水、废气、废渣及重金属排放量分别为 1 231.19、473.89、785.10 和 6.08 万 t,减少温室气体排放 32.92 万 t (以 CO₂-eq 计),可有效提高区域节能减排能力。

(4) 废弃空调产生量增速最大、重量占比最高,其资源回收价值和资源环境效益最高,预计是未来几年回收利用潜力最高的电子废弃物。2019~2025 年京津冀地区企业废弃空调回收处理量年增长率至少提高到 15% 时,才能达到政府规划的规范回收处理率(50%)目标,减少制冷剂泄漏(相当于 167.93 万 t CO₂ 排放)对臭氧层的破坏和全球变暖的影响。如果要达到 2025 年 100% 规范回收,减少 258.14 万 t CO₂ 排放,年增长率至少达到 25%。

(5) 综合上述结论,京津冀电子废弃物产生量大、蕴含丰富再生资源,通过合理回收利用能够产生高额经济价值,并显著降低能源消耗和污染物排放。可有效促进区域资源可持续循环利用及改善区域生态环境质量,具有重要的回收利用潜力。为此,管理部门应尽快完善基金补贴制度,提高废弃电器电子产品处理企业生产积极性;加强对非正规拆解部门的监督与管理,降低电子废弃物非规范拆解量;建立区域电器电子产品信息共享平台,通过产品生产、使用、废弃、回收处理和资源再利用全过程的信息追踪,实现京津冀地区电子废弃物资源化全生命周期协同管理。

致谢:中国物资再生协会电子产品回收利用分会于可利秘书长及京津冀电子废弃物物质处理企业相关负责人对本研究的指导和帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Wen Z G, Zhang C K, Ji X L, et al. Urban mining's potential to relieve China's coming resource crisis[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, **19**(6): 1091-1102.
- [2] Yao H L, Zhang C H. A bibliometric study of China's resource recycling industry policies: 1978-2016 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, **134**: 80-90.
- [3] Baldé C P, Forti V, Gray V, et al. The global e-waste monitor-2017 [R]. Bonn/Geneva/Vienna: United Nations University

- (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), 2017. 60-79.
- [4] Cucchiella F, D'adamo I, Koh S C L, *et al.* Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **51**: 263-272.
- [5] Diaz L A, Lister T E. Economic evaluation of an electrochemical process for the recovery of metals from electronic waste [J]. *Waste Management*, 2018, **74**: 384-392.
- [6] Guo Q X, Wang E C, Nie Y Y, *et al.* Profit or environment? A system dynamic model analysis of waste electrical and electronic equipment management system in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **194**: 34-42.
- [7] Zeng X L, Mathews J A, Li J H. Urban mining of e-waste is becoming more cost-effective than virgin mining [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (8): 4835-4841.
- [8] Huang C L, Bao L J, Luo P, *et al.* Potential health risk for residents around a typical e-waste recycling zone via inhalation of size-fractionated particle-bound heavy metals [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **317**: 449-456.
- [9] Song Q B, Li J H. Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: A systematic review[J]. *Waste Management*, 2014, **34** (12): 2587-2594.
- [10] Zeng X, Xu X J, Boezen H M, *et al.* Children with health impairments by heavy metals in an e-waste recycling area[J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 408-415.
- [11] 严骁, 李淑圆, 王美欢, 等. 电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析: 以清远市龙塘镇为例 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (2): 953-960.
- Yan X, Li S Y, Wang M H, *et al.* Liver and kidney function of e-waste dismantling workers and potential influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (2): 953-960.
- [12] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39** (2): 916-926.
- Yin Y M, Zhao W T, Huang T, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an e-waste dismantling area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (2): 916-926.
- [13] Wang H D, Han H G, Liu T T, *et al.* "Internet + " recyclable resources: A new recycling mode in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, **134**: 44-47.
- [14] Xue Y Y, Wen Z G, Bressers H, *et al.* Can intelligent collection integrate informal sector for urban resource recycling in China? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **208**: 307-315.
- [15] Tran H P, Wang F, Dewulf J, *et al.* Estimation of the unregistered inflow of electrical and electronic equipment to a domestic market: A case study on televisions in Vietnam [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (5): 2424-2433.
- [16] Abbondanza M N M, Souza R G. Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil[J]. *Waste Management*, 2019, **85**: 374-384.
- [17] Imran M, Haydar S, Kim J, *et al.* E-waste flows, resource recovery and improvement of legal framework in Pakistan [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, **125**: 131-138.
- [18] Parajuly K, Habib K, Liu G. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Denmark: Flows, quantities and management[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, **123**: 85-92.
- [19] Duan H B, Hu J K, Tan Q Y, *et al.* Systematic characterization of generation and management of e-waste in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23** (2): 1929-1943.
- [20] Zeng X L, Gong R Y, Chen W Q, *et al.* Uncovering the recycling potential of "new" WEEE in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (3): 1347-1358.
- [21] Tan Q Y, Dong Q Y, Liu L L, *et al.* Potential recycling availability and capacity assessment on typical metals in waste mobile phones: A current research study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **148**: 509-517.
- [22] Cao J, Chen Y Y, Shi B, *et al.* WEEE recycling in Zhejiang province, China: generation, treatment, and public awareness [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **127**: 311-324.
- [23] 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.
- [24] 郭晓倩, 孟伟庆, 汲奕君. 基于改进 logistic 模型的天津市电子废弃物产生量预测[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37** (3): 188-193.
- Guo X Q, Meng W Q, Ji Y J. Estimation of electrical and electronic equipment waste generation using a modified logistic model in Tianjin city[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37** (3): 188-193.
- [25] Xue M Q, Kendall A, Xu Z M, *et al.* Waste management of printed wiring boards: A life cycle assessment of the metals recycling Chain from liberation through refining [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (2): 940-947.
- [26] Rocchetti L, Beolchini F. Environmental burdens in the management of end-of-life cathode ray tubes [J]. *Waste Management*, 2014, **34** (2): 468-474.
- [27] Alcántara-Concepción V, Gavilán-García A, Gavilán-García I C. Environmental impacts at the end of life of computers and their management alternatives in México[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **131**: 615-628.
- [28] Song X L, Zhang C L, Yuan W Y, *et al.* Life-cycle energy use and GHG emissions of waste television treatment system in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, **128**: 470-478.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 废弃电器电子产品处理目录(2014 年版) [EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbgg/201502/t20150213_664456.html, 2014/2015-02-09.
- [33] 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.

- [34] 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, Lu 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.
- [35] 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): 2274-2278.
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): 2274-2278.
- [36] 华新环保. 环境责任-节能减排效果[EB/OL]. <http://www.hxepd.com/h-col-101.html>, 2018-06-12.
- [37] Lu Y, Xu Z M. Precious metals recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspective[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, **113**: 28-39.
- [38] 张欣. 天津市废旧电器电子产品回收体系研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2010. 26-41.
Zhang X. Study on the recovery system of waste electrical & electronic equipments in Tianjin[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2010. 26-41.
- [39] Song W T, Huang J B, Zhong M R, *et al.* The impacts of nonferrous metal price shocks on the macroeconomy in China from the perspective of resource security [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **213**: 688-699.
- [40] 杜士娟. 基于情景分析法的京津冀能源消费碳排放预测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018. 16-25.
Du S J. Research on carbon emissions prediction of energy consumption in Beijing-Tianjin-Hebei based on scenario analysis method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018. 16-25.
- [41] 中国家用电器研究院. 中国废弃电器电子产品回收处理行业白皮书2018[R]. 北京: 中国家用电器研究院, 2019. 6-9.
China Household Electric Appliance Research Institute. White paper on WEEE recycling industry in China 2018[R]. Beijing: China Household Electrical Appliances Research Institute, 2019. 6-9.
- [42] Choudhari C S, Sapali S N. Performance investigation of natural refrigerant R290 as a substitute to R22 in refrigeration systems [J]. *Energy Procedia*, 2017, **109**: 346-352.
- [43] 国务院办公厅. 关于印发生产者责任延伸制度推行方案的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/03/content_5156043.htm, 2017-01-03.



CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)