

“土壤环境与污染修复丛书”序

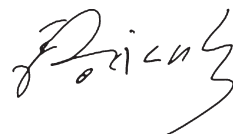
土壤是农业的基本生产资料，是人类和地表生物赖以生存的物质基础，是不可再生的资源。土壤环境是地球表层系统中生态环境的重要组成部分，是保障生物多样性和生态安全、农产品安全和人居环境安全的根本。土壤污染是土壤环境恶化与质量退化的主要表现形式。当今我国农用地和建设用地土壤污染态势严峻。2018年5月18日，习近平总书记在全国生态环境保护大会上发表重要讲话指出，要全面落实土壤污染防治行动计划，突出重点区域、行业和污染物，强化土壤污染管控和修复，有效防范风险，让老百姓吃得放心、住得安心。联合国粮农组织于同年5月在罗马召开全球土壤污染研讨会，旨在通过防止和减少土壤中的污染物来维持土壤健康和食物安全，进而实现可持续发展目标。可见，土壤污染是中国乃至全世界的重要土壤环境问题。

中国科学院南京土壤研究所早在1976年就成立土壤环境保护研究室，进入21世纪后相继成立土壤与环境生物修复研究中心（2002年）和中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室（2008年）；开展土壤环境和土壤修复理论、方法和技术的应用基础研究，认识土壤污染与环境质量演变规律，创新土壤污染防治与安全利用技术，发展土壤环境学和环境土壤学，创立土壤修复学和修复土壤学，努力建成土壤污染过程与绿色修复国家最高水平的研究、咨询和人才培养基地，支撑国家土壤环境管理和土壤环境质量改善，引领国际土壤环境科学技术与土壤修复产业化发展方向，成为全球卓越研究中心；设立四个主题研究方向：①土壤污染过程与生物健康，②土壤污染监测与环境基准，③土壤圈污染物循环与环境质量演变，④土壤和地下水污染绿色可持续修复。近期，将创新区域土壤污染成因理论与管控修复技术体系，提高污染耕地和场地土壤安全利用率；中长期，将创建基于“基准-标准”和“减量-净土”的土壤污染管控与修复理论、方法与技术体系，支撑实现全国土壤污染风险管控和土壤环境质量改善的目标。

“土壤环境与污染修复丛书”由中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室、中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心等部门组织撰写，主要由从事土壤环境和土壤修复两大学科体系研究的团队及成员完成，其内容是他们多年研究进展和成果的系统总结与集体结晶，以专著、编著或教材形式持续出版，旨在促进土壤环境科学和土壤修复科学的原始创新、关键核心技术方法的发展和

实际应用，为国家及区域打好土壤污染防治攻坚战、扎实推进净土保卫战提供系统性的新思想、新理论、新方法、新技术、新模式、新标准和新产品，为国家生态文明建设、乡村振兴、美丽健康和绿色可持续发展提供集成性的土壤环境保护与修复科技咨询和监管策略，也为全球土壤环境保护和土壤污染防治提供中国特色的知识智慧和经验模式。

中国科学院南京土壤研究所研究员
中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室主任



2021年6月5日

序

随着电子产品更新换代的加速,“电子废弃物”已成为全球增速最快的固体废物之一。其实,电子废弃物中通常不仅含有铜、铝、锌及塑料、玻璃等成分,而且隐藏着金、银、铂、钯、铟、钇、钆等稀贵金属,被誉为最具代表性的“城市矿产”。在当今社会矿产资源快速减少和环境污染加剧的双重压力下,这种“城市矿产”的资源化再利用备受重视。我国早在 20 世纪 70 年代就开展了电子废弃物的拆解与回收活动,主要采用手工拆卸、露天焚烧和直接酸溶等粗放式处理与回收技术,导致电子废弃物中有毒有害物质向土壤、水体、大气直接排放,造成场地土壤、地下水及周边耕地、地表水出现诸如镉、铅、汞、铜、锌、铬等重金属和多氯联苯、多环芳烃、多溴联苯醚等难降解有机化合物的污染,危害生态安全、农产品安全和人体健康。因此,系统开展电子废弃物拆解场地环境污染特征、风险评估与防控修复研究是我国土壤污染防治的现实需求,也是土壤环境科学与技术创新领域的重大需求。

《电子废弃物拆解场地污染与修复》联系全球电子废弃物资源现状和发展趋势,结合这种资源回收利用技术与管理措施,围绕电子废弃物拆解场地污染特征-污染过程-风险评估-防控修复的主题,全面系统介绍了我国典型拆解区场地土壤的污染特征与成因、污染物迁移过程、生态风险评估、组合式修复技术研发及工程示范等方面的最新研究成果,具有重要的科技创新价值和治理指导作用。

该书是在“十三五”国家重点研发计划项目(No. 2019YFC1803700)资助下、科研人员三年多来研究成果的系统集成。该书结构完整、内容丰富、图文并茂、科学全面、引导性强,是电子废弃物拆解场地污染与修复研究领域的又一新作。相信该书的出版将有助于丰富和发展环境科学与工程、土壤学、生态学等学科,也必将有助于推进和发展我国土壤修复产业和生态环境保护事业。



中国科学院南京土壤研究所研究员 骆永明

2026 年 4 月 20 日

前 言

当前，随着社会经济快速发展和信息化、数字化、产业化的推进，电子废弃物产生量与日俱增，已经成为全球增长最快的固体废物。电子废弃物具有资源环境双重属性，不仅含有铜、金、稀土等战略金属，同时部分电子废弃物也被《巴塞尔公约》列为“危险废物”。电子废弃物不当拆解排放的有害物质对土壤、水体和大气等存在严重的环境风险，直接威胁到人民群众的身体健康。因此，加强电子废弃物绿色低碳循环利用，防治电子废弃物污染，保护生态环境，保障人体健康，是全面推进生态文明建设的重要任务。“十三五”期间，中国科学院南京土壤研究所承担了国家重点研发计划项目（No. 2019YFC1803700），该项目面向我国华东地区典型废旧电器拆解场地及污染区复合污染土壤治理的重大科技需求，针对典型废旧电器拆解场地及其污染区土壤复合污染过程不清、通量不明、修复技术单一、工程修复效率低、缺乏修复技术集成体系和技术规范等问题，通过现场调查、动态监测、模型模拟、应用研究及工程示范等综合研究方法与手段，系统揭示了华东废旧电器拆解场地有机污染物（多氯联苯、多溴联苯醚等）和重金属（镉、铜等）迁移规律，构建了拆解场地土壤-水体污染物传输扩散模型；建立了拆解场地及其污染区源头阻隔-原位稳定与分离-污染区生物修复与生态重建的适用性组合式修复工程技术集成体系；形成了华东废旧电器拆解场地及其污染区复合污染修复集成技术方案和推广模式，为我国废旧电器拆解场地及其污染区复合污染土壤治理修复提供科技支撑，助力美丽乡村建设和乡村振兴。

本书是项目组对华东废旧电器拆解场地及其污染区复合污染特征、风险评估、迁移扩散规律和修复技术集成与工程示范研究工作的总结。本书围绕电子废弃物拆解场地复合污染风险与修复的主题，全面系统分析了电子废弃物的资源现状、资源化利用的处置技术与发展方向、电子废弃物管理现状与对策、电子废弃物拆解场地污染特征与成因分析、拆解场地土壤污染过程与模拟预测、拆解场地污染生态风险评估、拆解场地污染源防控技术、拆解场地复合污染组合式修复技术、拆解场地周边污染区生物修复与安全利用技术及效能评估方法、拆解场地污染区修复技术集成与工程示范等。全书共分 14 章。第一章介绍电子废弃物定义、产生量、资源环境双重属性及其发展趋势；第二章介绍电子废弃物预处理技术现状、典型金属和非金属组分资源化技术现状、资源化二次污染及其治理现状、回收利用存在的主要问题及发展方向等；第三章介绍电子废弃物管理现状与对策；第四章介绍电子废物集中拆解园区污染物排放规律与土壤污染特征、新旧园区集中拆

解区域土壤污染特征与成因分析、分散式拆解区域土壤重金属污染特征与成因分析等；第五章介绍电子废弃物拆解场地土壤-水体污染物传输扩散模型构建、复合污染物在土壤-地下水中迁移扩散过程的模拟预测、典型电子废弃物拆解场地土壤-地下水重金属传输通量等；第六章介绍平原区拆解场地周边土壤复合污染与农产品安全评估、丘陵区拆解场地周边土壤复合污染生态风险评估、拆解场地周边土壤微生物群落特征分析等；第七章介绍拆解企业基础设施污染防治、主要的污染源防控技术、环境管理、环境监测、应急管理等；第八章介绍固化/稳定化技术研究及应用进展、热脱附技术研究及应用进展、固化/稳定化-热脱附组合修复技术研究及应用等；第九章介绍污染土壤旋流分选减量化工程技术、污染土壤旋流自转洗脱工程技术、污染土壤旋流分选减量-自转洗脱集成修复工程示范等；第十章介绍微生物好氧降解作用、生物刺激修复作用、植物-微生物耦合修复作用及技术组合田间应用效果评估等；第十一章介绍电子废弃物拆解场地周边污染区土壤植物萃取修复、场地周边中低污染水田多效协同的植物修复模式、场地周边污染旱地多效协同的植物修复模式等；第十二章介绍新型土壤调理剂、微生物菌剂、低积累水稻品种及土壤钝化剂的田间应用等；第十三章介绍土壤污染生态风险评价方法、场地周边污染区土壤特征污染物分析、场地周边污染区土壤污染空间分布特征、基于蒙特卡罗方法的污染区土壤污染生态风险评价研究、污染区修复技术效能评估体系、污染区修复技术应用预期效果评估等；第十四章介绍平原区和丘陵区典型废旧电器拆解场地周边污染区复合污染修复技术集成与工程示范，并提出了加强电子废弃物拆解场地污染风险防范与管控建议。

本书是国家重点研发计划项目团队的集体成果，全书由中国科学院大学南京学院岗位教师滕应研究员拟定框架，由赵玲研究员和滕应研究员统稿、定稿。全书共 14 章，具体撰写分工如下：第一章，滕应、赵玲、骆永明；第二章，李彬、王怀栋、吴玉锋、赵智博、王林彬；第三章，滕应、马文亭、沈仁芳；第四章，林匡飞、沈城、赵玲；第五章，林匡飞、姚槐应、俞永祥、张明珠；第六章，汪海珍、赵学强、徐勇峰、严康、吴内、代文台、田康、胡文博、王霞；第七章，钟重、林星、赵浙卿；第八章，肖愉、元妙新；第九章，刘毅、马凯；第十章，曾军、徐勇峰、朋婷婷；第十一章，林琦、秦宏、陈俊乔、金宇；第十二章，汪海珍、朱晓芳、赵学强、戴中民；第十三章，吴玉锋、赵智博、王林彬；第十四章，汪海珍、黄标、赵玲、王笑咪、洪志能。本书在出版过程中，得到了中国科学院大学南京学院骆永明研究员和沈仁芳研究员的悉心指导，在此一并表示诚挚的谢意！

由于著者水平有限，书中难免存在疏漏之处，敬请各位同仁批评指正。

滕 应

2026 年 5 月于南京

目 录

“土壤环境与污染修复丛书”序

序

前言

第一章 电子废弃物资源现状与趋势	1
第一节 电子废弃物类型及产生量	1
一、电子废弃物类型	1
二、电子废弃物产生量	2
第二节 电子废弃物资源环境双重属性	5
一、再生资源属性	5
二、环境污染物属性	7
三、电子废弃物回收利用情况	8
四、电子废弃物资源开发利用效益分析	11
第三节 电子废弃物资源的发展趋势	12
一、电子废弃物产生量估算与预测	12
二、电子废弃物可回收资源潜力	14
参考文献	16
第二章 电子废弃物资源化利用技术与发展方向	19
第一节 电子废弃物预处理技术现状	19
一、拆解技术	19
二、破碎技术	20
三、分选技术	20
四、典型家电预处理流程	22
第二节 电子废弃物中典型金属资源化技术现状	26
一、废旧线路板中铜及稀贵金属的回收	26
二、废旧 CRT 显示器中金属铅的回收	29
第三节 电子废弃物中非金属组分资源化技术现状	32
一、废塑料资源化技术	32
二、废旧热固性树脂资源化技术	34
第四节 电子废弃物资源化二次污染及其治理现状	36
一、电子废弃物资源化过程二次污染来源分析	36

二、电子废弃物资源化过程二次污染治理主要手段·····	40
第五节 电子废弃物资源回收利用技术的发展方向·····	40
参考文献·····	41
第三章 电子废弃物管理现状与对策·····	45
第一节 发达国家电子废弃物管理现状与对策·····	45
一、欧盟电子废弃物管理现状与对策·····	45
二、美国电子废弃物管理现状与对策·····	54
三、日本电子废弃物管理现状与对策·····	58
第二节 我国电子废弃物管理现状与对策·····	61
一、管理现状·····	61
二、存在问题和对策·····	70
参考文献·····	74
第四章 电子废弃物拆解场地土壤污染特征与成因分析·····	76
第一节 拆解场地周边污染区土壤特征污染物分析·····	76
一、拆解场地周边污染区概况·····	76
二、样品采样与分析·····	76
三、土壤污染来源识别·····	80
第二节 拆解场地周边污染区土壤污染特征分析方法·····	81
一、土壤污染数据预处理·····	81
二、土壤污染数据 SPSS 正态性检验·····	82
三、土壤污染数据 GS+半变异函数拟合·····	82
四、土壤污染空间插值与分布特征分析·····	83
第三节 电子废弃物集中拆解园区污染物排放规律与土壤污染特征·····	84
一、电子废弃物回收拆解处置场地及周边 PBDEs 和重金属排放特征·····	84
二、废弃印制电路板烘烤中 PBDEs 及重金属含量排放特征·····	93
三、拆解渣体堆置过程中污染物排放规律·····	100
第四节 新旧园区集中拆解区域土壤污染特征与成因分析·····	101
一、园区场地土壤采样监测方案·····	101
二、旧园区土壤重金属和有机污染物分布特征·····	102
三、新园区土壤重金属和有机污染物分布特征·····	105
第五节 分散式拆解区域土壤重金属污染特征与成因分析·····	108
一、土壤样品采集·····	108
二、散户拆解方式土壤重金属污染特征·····	108
参考文献·····	111

第五章 电子废弃物拆解场地土壤污染过程与模拟预测·····	112
第一节 拆解场地土壤-水体污染物传输扩散模型构建·····	112
一、复合污染物传输扩散概念模型·····	112
二、复合污染物传输扩散相关的数学模型·····	115
三、数值模拟方法及软件·····	117
第二节 复合污染物在土壤-地下水中迁移扩散过程的模拟预测·····	118
一、堆积渣体中重金属和有机污染物迁移扩散模拟预测·····	118
二、填埋渣体中重金属和有机污染物迁移扩散模拟预测·····	120
三、表层高浓度土壤中重金属和有机污染物迁移扩散模拟预测·····	122
第三节 典型电子废弃物拆解场地土壤-地下水重金属传输通量·····	124
一、通量计算方法·····	124
二、原位采集土壤渗滤液通量传输装置·····	125
三、电子废弃物拆解场地土壤污染物传输通量原位观测·····	126
四、典型电子废弃物拆解场地土壤重金属迁移过程及驱动因子·····	128
参考文献·····	135
第六章 电子废弃物拆解场地污染生态风险评估·····	136
第一节 基于蒙特卡罗方法的污染区土壤污染生态风险评价研究·····	136
一、内梅罗综合污染指数评价·····	136
二、基于蒙特卡罗方法的内梅罗综合污染指数评价模型构建·····	138
三、潜在生态风险指数评价·····	138
四、基于蒙特卡罗方法的潜在生态风险指数评价模型构建·····	140
五、污染区土壤污染生态风险评价结果及其分析·····	140
第二节 平原区拆解场地周边土壤复合污染与农产品安全评估·····	141
一、平原区拆解场地周边土壤有机污染生态风险评估·····	141
二、平原区拆解场地周边土壤重金属污染生态风险评估·····	150
三、平原区拆解场地周边农产品重金属污染评估·····	152
第三节 丘陵区拆解场地周边土壤复合污染生态风险评估·····	156
一、丘陵区拆解场地周边土壤有机污染生态风险评估·····	156
二、丘陵区拆解场地周边土壤重金属污染生态风险评估·····	166
第四节 拆解场地周边土壤微生物群落特征分析·····	174
一、平原区拆解场地周边土壤微生物群落特征·····	174
二、丘陵区拆解场地周边土壤微生物群落特征·····	194
三、长期污染对水稻土固氮微生物群落结构及功能的影响·····	200
第五节 拆解场地污染生态风险整体评估·····	205
参考文献·····	208

第七章 电子废弃物拆解场地污染源防控技术	217
第一节 拆解企业基础设施污染防控	217
一、拆解企业功能分区	217
二、功能区设计和建设	217
第二节 拆解企业主要污染源防控技术	218
一、废气污染防控技术	218
二、废水污染防控技术	220
三、固体废物污染防控技术	221
四、土壤污染防控技术	222
第三节 拆解企业环境管理	222
一、管理体系构成	222
二、管理制度	222
第四节 拆解企业环境监测	222
第五节 拆解企业应急管理	222
一、应急预案管理	222
二、环境应急预案	223
三、防汛、消防应急预案	223
四、安全应急预案	223
五、应急预案的培训、演练	223
六、突发环境事件报告	223
第八章 电子废弃物拆解场地复合污染固化/稳定化-热脱附组合修复技术	224
第一节 固化/稳定化技术研究及应用进展	224
一、固化/稳定化技术原理	224
二、固化/稳定化药剂分类	224
三、固化/稳定化效果评价方法	226
四、固化/稳定化效果影响因素	229
五、固化/稳定化长期稳定性影响因素	230
六、固化/稳定化技术应用	231
第二节 热脱附技术研究及应用	233
一、热脱附技术原理	233
二、热脱附技术分类	233
三、热脱附效果影响因素	236
四、热脱附技术应用	237
第三节 固化/稳定化-热脱附组合修复技术研究及应用	239
一、固化/稳定化-热脱附组合修复技术原理	239

二、固化/稳定化-热脱附组合修复技术研究	239
三、固化/稳定化-热脱附组合修复技术应用	244
参考文献	247
第九章 拆解场地复合污染旋流分选-淋洗萃取-自转脱附组合修复技术	250
第一节 复合污染土壤减量与淋洗修复现状	250
一、复合污染土壤中污染物的结合形式及强度	250
二、复合污染土壤减量化技术	251
三、复合污染土壤淋洗修复技术	252
第二节 污染土壤旋流分选减量化	253
一、污染土壤粒径与污染物浓度的关系	253
二、污染土壤旋流分选减量化原理	254
三、污染土壤旋流分选减量化效率	257
第三节 污染土壤旋流自转洗脱	259
一、旋流场颗粒自转形式及自转洗脱过程	259
二、污染土壤自转洗脱技术原理	261
三、污染土壤旋流自转淋洗脱附效率	263
第四节 污染土壤旋流分选减量-自转洗脱集成修复工程示范	271
一、工程场址及污染土壤概况	271
二、集成修复工艺流程设计及运行方案	274
三、集成修复工艺修复效率	276
四、集成修复工艺经济性分析	282
参考文献	283
第十章 电子废弃物拆解场地周边污染区土壤微生物修复技术	286
第一节 微生物好氧降解多氯联苯	286
一、降解微生物	287
二、高效 PCB-77 降解菌群的物种互作	290
第二节 多氯联苯污染土壤生物刺激修复作用	294
一、修复材料遴选	294
二、施用优选材料对多氯联苯转化的影响	294
第三节 多氯联苯污染土壤植物-微生物耦合修复作用	296
一、修复材料遴选	296
二、施用优选材料对土壤多氯联苯不同组分的影响	297
三、优选材料对土壤细菌群落的影响	298
第四节 多氯联苯污染土壤修复技术田间应用	300
一、旱地材料遴选	300

二、水田材料遴选	301
三、优选材料在旱地和水田的实际应用	301
参考文献	303
第十一章 电子废弃物拆解场地周边污染区土壤植物修复技术	305
第一节 拆解场地周边污染区土壤植物萃取修复	305
一、伴矿景天的生物学特征与重金属富集	305
二、伴矿景天的大田栽培	307
三、伴矿景天萃取修复重金属的强化措施	309
第二节 拆解场地周边中低污染水田多效协同的植物修复模式	314
一、伴矿景天与水稻轮作修复模式	314
二、水稻安全生产技术	314
三、伴矿景天-水稻轮作体系的综合调控	319
第三节 拆解场地周边污染旱地多效协同的植物修复模式	322
一、伴矿景天与旱地植物间套作或轮作修复模式	322
二、旱地经济作物可食部位重金属含量及其安全生产技术	323
三、伴矿景天-旱作植物间作体系镉的吸收和转运	324
参考文献	326
第十二章 电子废弃物拆解场地周边污染区土壤安全利用技术	328
第一节 新型土壤调理剂	328
一、碱木素	328
二、改性甘蔗渣	330
三、电石渣、磁石、生物炭	333
第二节 微生物菌剂	335
第三节 低积累水稻品种	339
第四节 土壤钝化剂的田间应用	342
一、甘蔗种植地的田间应用	343
二、玉米种植地的田间应用	344
三、大豆种植地的田间应用	345
四、油菜种植地的田间应用	345
参考文献	346
第十三章 电子废弃物拆解场地周边污染区风险评价与修复技术效能评估	351
第一节 概述	351
一、电子废弃物拆解土壤污染风险评价方法	351
二、污染土壤的修复目标与修复效果评价	355
第二节 污染区修复技术效能评估指标设定	355

一、修复技术效能评估指标选择原则·····	356
二、有效污染物削减指标·····	356
三、修复技术的经济性指标·····	357
四、修复技术的环境影响指标·····	357
第三节 污染区修复技术应用效果评估·····	358
一、修复技术应用削减有效污染物效果评估·····	358
二、修复技术应用的成本效益评估·····	358
三、修复技术应用的生态环境影响评估·····	359
参考文献·····	359
第十四章 电子废弃物拆解污染区土壤修复技术集成与工程示范·····	362
第一节 平原区土壤修复技术集成与工程示范·····	362
一、平原区不同环境介质复合污染特征·····	362
二、平原区复合污染土壤修复组合式技术工程示范·····	371
第二节 丘陵区土壤修复技术集成与工程示范·····	374
一、拆解污染区不同环境介质复合污染特征·····	374
二、拆解场地周边污染区水田复合污染修复组合式技术工程示范·····	383
三、拆解场地周边污染区旱地复合污染修复组合式技术工程示范·····	389
参考文献·····	393
后记·····	396

第一章 电子废弃物资源现状与趋势

随着电子信息技术的快速发展,大量的电子电器产品涌入了人们的日常生活,这些产品在被淘汰后就变成了大量的电子废弃物,即俗称的“电子垃圾”。电子废弃物中含有金、银、铜、铂等高价材料,如果处置不当会对自然生态环境和人类生命健康造成严重危害。因此,面对快速增加的电子废弃物,世界各国必须科学正视其危害和价值,从更高的站位共同采取行动,遏制电子废弃物产生的环境危害,为人类可持续发展做出贡献。

第一节 电子废弃物类型及产生量

电子废弃物是废弃电子电器设备(waste electronic and electrical equipment, WEEE)的简称,是指废弃的电子电器产品、电子电气设备及废弃零部件、元器件和国家规定纳入电子废物管理的物品及物质,包括工业生产过程产生的报废品和消费环节废弃的产品及设备(United Nations Environment Programme, 2007)。

一、电子废弃物类型

电子电器设备包含大量的产品,种类繁多。为了便于统计,可将电子电器设备根据相似的功能、相近的材料成分、平均重量和类似的使用寿命等属性进行分类。根据电子废弃物的管理特点,欧盟 2003 年颁布的《WEEE 指令》中把电子废弃物分为 6 大类,分别为:

- (1) 温度交换设备,包括冰箱、冰柜、空调、加热泵等典型设备;
- (2) 荧光屏和监视器,包括电视机、显示器、笔记本电脑、平板等典型设备;
- (3) 照明设备,包括荧光灯、高强度放电灯、LED 灯等典型设备;
- (4) 大型设备,包括洗衣机、烘干机、洗碗机、电烤箱、印刷机器、复印机、光伏板等典型设备;
- (5) 小型设备,包括真空吸尘器、微波炉、通风设备、烤面包机、电水壶、电动剃须刀、电子秤、收音机、摄像机、电动玩具、小型电动工具、小型医疗设备等典型设备;
- (6) 小型 IT 和通信设备,包括手机、全球定位系统(GPS)设备、便携式计算器、路由器、打印机、电话机等典型设备。

欧盟颁布的电子废弃物类别中不包含任何类型的电池、蓄能器和汽车电器元件。

世界各国也相继规定了电子废弃物的产品类型。中国在 2009 年和 2015 年分别公布了第一批和第二批《废弃电器电子产品处理目录》，其中第一批目录中的电子废弃物主要是指“四机一脑”，即电视机、洗衣机、空调、电冰箱和电脑；第二批目录在第一批的基础上增加了吸油烟机、电热水器、燃气热水器、打印机、复印机、传真机、监视器、移动手机和电话单机共 9 种产品，涵盖了更多的电子废弃物产品类型。

二、电子废弃物产生量

（一）全球产生量分析

随着全球信息化时代进程的推进和电子信息等高科技产业的发展，人们对电子产品的依赖程度以及需求量不断升高，电子产品更新换代周期越来越短，导致了电子废弃物的产生量和存量不断增加，预计增长率达到每年 3%~5%（Forti et al., 2020）。联合国《2020 年全球电子废弃物监测》报告显示，2019 年全球电子废弃物年产生量为 5360 万 t，相比 2014 年增加了 20% 以上。2014 年全球共产生了 4180 万 t 电子废弃物，其中 60% 是家用电器，包括各种厨电、灯具、娱乐影音设备等；第二大种类是电子通信和办公设备，包括移动电话、笔记本、打印机、计算机等，占比共 7% 左右。电子废弃物已成为世界上增长最快的固体废物，在 2014~2019 年期间以每年约 200 万 t 的速度增长。据估算，2020~2030 年，仍将保持年均 4% 左右的增长速度，预计到 2030 年将达 7400 万 t，2050 年增至 1.2 亿 t。全球电子废弃物总产生量及人均产生量情况如图 1-1 所示，其中 2021~2030 年的产生量为模型预测值。

联合国发布的《2020 年全球电子废弃物监测》报告还对 2019 年全球电子废弃物的设备类型和来源地区进行了统计分析。从设备类型来看，全球小型设备、大型设备、温度交换设备产生的电子废弃物分别为 1740 万 t、1310 万 t 和 1080 万 t，占比分别为 32.46%、24.44% 和 20.15%；而屏幕显示器、小型 IT 和电信设备、灯具所产生的电子废弃物分别为 670 万 t、470 万 t 和 90 万 t，占比分别为 12.50%、8.77% 和 1.68%。除此之外，近年来不同类型的电子废弃物的增长速度存在差异。随着全球经济的发展，尤其是低收入国家人民生活水平的提升，初级电子产品的使用量逐渐增加导致温度交换设备、大型设备、灯具和小型设备电子废弃物增速加快，其相应的增长速度分别为 7%、5% 和 4%。从地区来看，电子废弃物的产生量在全球五大洲也存在较大差异。其中，亚洲产生的电子废弃物数量最多，约为 2490 万 t，占比 46.46%；其次为美洲和欧洲，分别为 1310 万 t 和 1200 万 t，占比分别为 24.44% 和 22.39%；非洲和大洋洲电子废弃物总量分别为 290 万 t

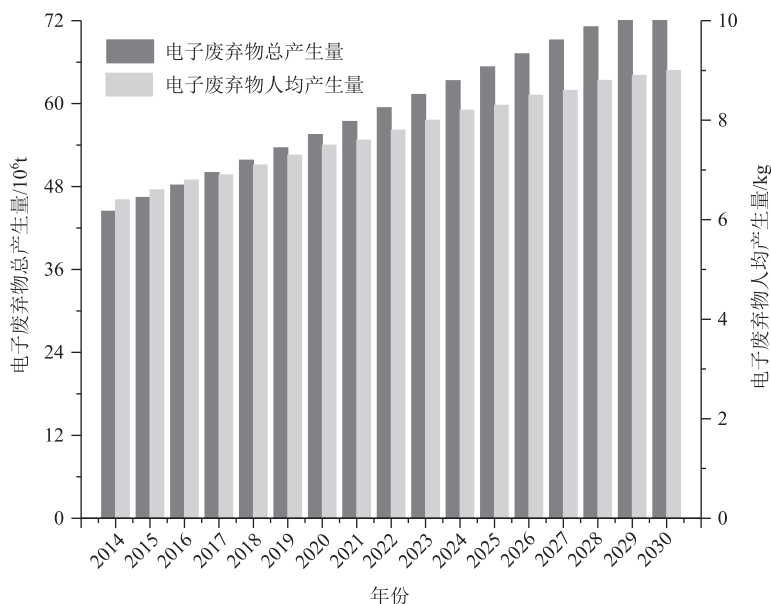


图 1-1 全球电子废弃物总产生量及人均产生量

和 70 万 t，占比分别为 5.41%和 1.31%。但是，欧洲的电子废弃物人均产生量排名全球第一，为 16.2kg；大洋洲和美洲分列第二位和第三位，人均产生量分别为 16.1kg 和 13.3kg；而亚洲和非洲电子废弃物人均产生量则低很多，分别为 5.6kg 和 2.5kg。从国家来看，2019 年电子废弃物产生量超过 100 万 t 的国家共有 12 个，分别是中国、美国、印度、日本、巴西、俄罗斯、印度尼西亚、德国、英国、法国、墨西哥和意大利，如表 1-1 所示。

表 1-1 2019 年电子废弃物产生量排名前 12 的国家

序号	国家	区域	电子废弃物产生量/10 ³ t	电子废弃物人均产生量/kg
1	中国	亚洲	10129	7.2
2	美国	美洲	6918	21
3	印度	亚洲	3230	2.4
4	日本	亚洲	2569	20.4
5	巴西	美洲	2143	10.2
6	俄罗斯	欧洲	1631	11.3
7	印度尼西亚	亚洲	1618	6.1
8	德国	欧洲	1607	19.4
9	英国	欧洲	1598	23.9
10	法国	欧洲	1362	21
11	墨西哥	美洲	1220	9.7
12	意大利	欧洲	1063	17.5

对于电子废弃物总产生量而言,中国作为经济发展迅速的发展中国家,其市场对电器电子产品的需求量巨大,同时中国也是电器电子产品的主要制造国,因此电子废弃物的产生量也位居第一,在2019年超过1000万t,其次是美国约692万t,印度323万t,日本257万t,巴西214万t。对于人均产生量而言,英国的人均产生量最高,达到23.9kg,其次是美国和法国,均为21kg。

(二) 中国产生量分析

中国作为全球电子电器产品第一大生产国和消费体,已经取代美国成为全球电子废弃物产生量最大、增速最快的国家。中国每年电子废弃物增长率为13%~15%,远远高于世界平均水平(Cucchiella et al., 2015)。自20世纪80年代大量的电子电器产品进入我国市场和家庭起,现今我国已经进入电子电器产品报废的高峰期。我国电子废弃物主要有3个来源:首先,我国本身就是电子产品生产大国(Guo et al., 2020),客户需求提高以及市场竞争加剧导致电子产品的使用周期、产品迭代的时间变短,产生大量的电子废弃物,2016年全球电子废弃物产生量估计为4820万t,其中中国产生了720万t,居世界首位;2017年中国电子废弃物回收认证企业回收拆解电视机、冰箱、洗衣机、空调、电脑等废旧家电设备超过7171万件。其次,在电子电器产品生产过程中会产生一定的边角料、不满足售卖标准的残次品等。再次,在中国禁止多种“洋垃圾”进口之前,每年会有30%~40%的电子废弃物聚集在亚洲,其中有70%~80%流入中国,经过长时间的积累,这一部分电子废弃物已经成为一个庞大的基数。同时,还可以根据电子电器产品的使用目的,将电子废弃物的来源分为社会源和工业源:以家庭为单位的消费者、个体消费者、大量使用电子电器设备的企业或者行政事业单位以及个体电子电器维修点属于社会源;电子电器设备制造企业和大型电子电器设备维修服务企业属于工业源。

根据《中国统计年鉴2020》数据,中国居民2019年移动电话、电视机、电冰箱、洗衣机的百户拥有量分别为508.6台、240.4台、201.1台、190.8台。从产品拥有数量上来看,排在前3位的分别是移动电话、空调和彩色电视机。中国常用电器和电子产品每百户拥有量在2014~2019年持续增长。其中,空调、热水器、吸油烟机的平均增长率均大于5%,而计算机、照相机市场相对饱和,每百户拥有量呈负增长趋势。

根据《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》数据分析,2020年首批目录产品理论报废量约为1.89亿台,报废重量约为534.17万t。其中,电视机5521.13万台,报废重量为101.55万t;电冰箱3694.94万台,报废重量为159.99万t;洗衣机3542.25万台,报废重量为109.46万t;房间空调器3883.76万台,报废重量为148.36万t;微型计算机2244.13万台,报废重量为14.81

万 t。第二批目录产品的理论报废量约为 5.27 亿台，报废重量约为 169.44 万 t。从数量上来看，第二批目录产品中移动电话的报废数量占常用电器电子产品理论报废数量的 55%以上。从不同地区理论报废量来看，排在前 5 位的省份依次是广东、江苏、山东、河南和四川。

第二节 电子废弃物资源环境双重属性

电子废弃物具有多种特征，如产生量大、来源广泛、危害性大、回收价值高及回收过程困难等，而高危害性和高经济价值性是电子废弃物最显著的两个特征。一方面，电子废弃物包含铅、铬、汞、镉、溴系阻燃剂（BFR）等有毒有害物质以及其他潜在有害物质，若不经任何处理而将这些有害物质随意丢弃或直接丢弃会对环境和人类健康造成极大危害（Kaya, 2016; 马永鹏等, 2019）；另一方面，电子废弃物还包含铜、锌、铁等有价金属元素，含量甚至超过自然矿物的金、银、铂、钨和钽等稀贵金属（Meng et al., 2018），以及塑料、玻璃纤维等可回收利用资源。因此，电子废弃物具有资源环境双重属性，处理不当会对环境和人体健康造成严重危害。

一、再生资源属性

电子废弃物中含有大量可回收利用的有价组分（如铜、锌、铁等）和稀金属材料（金、银、铂、钨、钽等）以及非金属材料（工程塑料、玻璃纤维、橡胶等），可以通过系统地回收和再加工，将电子废弃物变成具有高附加值的原材料资源。电子废弃物的化学成分随其类型、制造年代、来源和制造商的不同而存在差异。

从不同类型电子废弃物的组成（表 1-2）来看，电子废弃物富含的金属，尤其是贵金属含量能达天然矿物中贵金属含量的几十倍甚至上百倍，但回收其中贵

表 1-2 常见电子产品的主要组成成分的质量分数 （单位：%）

家用电子电器种类	铁	铜	其他金属	玻璃和陶瓷	阻燃塑料	易燃塑料
大型室内电器	60	6	2	10	0	12
其他家用电子电器产品	55	4	3	0	30	0
电动工具	30	9	9	15	12	12
办公电器	27	8	6	15	12	12
收音机和通信电器	50	10	4	0	12	14
电动厨具	24	5	8	10	0	38
其他	10	9	45	0	14	12

金属的成本却低得多。例如, 1t 废弃电脑中可回收 0.9kg 黄金、270kg 塑料、128.7kg 铜、1kg 铁、58.5kg 铅、39.6kg 锡、36kg 镍、19.8kg 铈和少量的钯、铂等贵金属(李金惠和温雪峰, 2006)。回收这类电子废弃物不仅可以产生可观的经济效益, 还可以有效降低天然矿石资源日益枯竭导致的资源保障风险。

不同来源的电子废弃物, 如废手机、废电脑和废电视中的金属成分含量也存在较大差异, 如表 1-3 所示(Tickner et al., 2016)。3 种电子废弃物中常见金属铁、铝等含量是废电视>废电脑>废手机; 而金、银、钯等贵金属含量则是废手机>废电脑>> 废电视。据估算, 1t 废手机、1t 废电脑和 1t 废电视中金属的价值分别为 23000 美元、16900 美元和 2300 美元, 而电子废弃物中稀贵金属的价值占金属总价值的绝大部分。电子废弃物作为再生资源, 其中稀贵金属的含量远高于原矿中稀贵金属的含量, 因此, 从电子废弃物中回收稀贵金属不但可以减少电子废弃物对环境的污染, 还能产生巨大的经济价值, 进而驱动着拆解市场规模的不断扩大。

表 1-3 不同来源电子废弃物中的金属成分

元素	废手机		废电脑		废电视	
	含量/%	价值占比/%	含量/%	价值占比/%	含量/%	价值占比/%
铜	12.8	3	20	6.9	10	23.2
铝	—	—	5	0.5	10	6.9
铁	6.5	0.1	7	0.2	28	4.8
铅	0.6	<0.1	1.5	0.2	1	0.7
镍	1.5	0.7	1	0.6	0.3	1.3
锡	1	0.7	2.9	2.6	1.4	9
银	0.36	7.6	0.1	2.8	0.03	5.8
金	0.0347	54.3	0.025	53.2	0.0017	26.3
钯	0.0151	33.5	0.011	33	0.001	22
总价值	23000 美元/t		16900 美元/t		2300 美元/t	

不同年代制造的电子产品中的重金属含量差异显著。以 2006 年欧盟正式实施《关于限制在电子电气设备中使用某些有害成分的指令》(简称《RoHS 指令》)为界, 可以把 1990~2016 年划分为两个阶段来比较电子废弃物塑料中重金属含量(韦旭等, 2022)。电子废弃物塑料中重金属含量在 1990~2006 年逐渐升高, 但在 2006 年后逐渐降低。锑(Sb)、锌(Zn)、钡(Ba)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、钴(Co)、镍(Ni)和锰(Mn)等重金属总含量的平均值在 1993 年为 1.119g/kg, 2006 年为 11.974g/kg, 2010 年为 1.631g/kg。在 1990~2006 年的第一阶段和 2007~2016 年的第二阶段, 《RoHS 指令》中限制使用的重金属 Pb、Cr 和 Cd 含量基本没有变化, 但溴系阻燃剂的常用增效剂 Sb 的含量在第二阶段显著降

低，这与《RoHS 指令》实施后电子废弃物塑料中溴系阻燃剂使用量减少有关。

电子废弃物中的金属组分，尤其是贵金属具有极高的经济价值，使其成为电子废弃物资源化再利用的重点；而非金属组分，如热固性树脂、玻璃纤维、陶瓷、橡胶等，因经济价值较低，常常采用焚烧或填埋的方式对其进行处理，极易造成环境污染。但随着科技的进步和资源回收利用的需要，将逐渐形成包括铁磁体、有色金属、贵金属和有机物质在内的电子废弃物全面回收利用方式。

二、环境污染物属性

电子废弃物因含有大量有害重金属、有毒塑料、溴系阻燃剂等环境污染物而被《巴塞尔公约》列为危险废物，这些有毒有害物质如处理不当将对土壤、水体和大气造成污染，最终威胁人类健康和生态安全。

电子废弃物成分相当复杂，在电子电器产品生产过程中需要添加多种重金属，如 Cu 拥有优良的导电性，广泛用于电子产品中的线路板、玻璃纤维环氧树脂表层的电镀加工或蚀刻工艺中；Pb 常用于铅锡合金的焊接中；Ni 常用于电镀业和电池业；Zn 一般用于黄铜合金、冰箱外壳、油箱等的生产过程。除了重金属，还会添加不同类型的有机物，包括邻苯二甲酸二丁酯（DBP）、邻苯二甲酸二（2-乙基己基）酯（DEHP）、壬基苯酚（NP）等塑料增塑剂，磷酸三苯酯（TPP）、多氯联苯（PCBs）、多溴联苯（PBBs）、多溴联苯醚（PBDEs）和多氯化萘（PCNs）等阻燃剂，以及聚氯乙烯（PVC）、多溴聚乙烯、丙烯腈、丁二烯、聚苯乙烯、聚丙烯（PP）、聚碳酸酯、尼龙、聚酰胺、人造橡胶等多种有机物质。以电脑为例，生产 1 台电脑的 700 多种原料中，对人体有害的超过 50%（王玲玲等，2006），其中废阴极射线管（cathode-ray tube, CRT）电脑中，每根显像管均含有一定量的 Pb、砷（As）、Ba、Cd 等有害化学物质；荧光粉中含有一定量易挥发的汞；液晶面板中含有少量的锡（Sn）、Cr、Zn 等重金属。

电子废弃物回收环节的环境污染较小，但其拆解过程中会产生并释放出大量的污染物，包括大量持久性有机污染物和重金属等毒害污染物，尤其是早期手工作坊式的电子废弃物拆解存在不规范处置现象，如填埋、露天焚烧和非法倾倒等，导致大量重金属、溴系阻燃剂和二噁英及呋喃类污染物进入环境中，对拆解场地周边的空气、土壤和水体造成严重污染。电子废弃物中的有毒物质以及不当处理所产生的有害物质还会严重威胁人体健康，包括对肺功能、生殖健康以及儿童生长发育等方面的影响。电子废弃物的不当处置除了排放有害物质外，还产生了大量的温室气体，加剧了全球气候变暖。据统计，2019 年超过 9800 万 t 二氧化碳当量的温室气体从废旧的电冰箱和空调中被排放至大气，相当于全球温室气体排放总量的 0.3%（Forti et al., 2020）。此外，这些电子废弃物还产生了 4400t 消耗臭氧的含氯氟烃（CFC）气体，将对全球臭氧层产生破坏性影响。

随着经济社会的快速发展,我国面临的资源环境瓶颈愈发凸显,资源环境形势日益严峻,而电子废弃物的再生利用,一方面可以大幅度减少我国经济生产中的污染物排放,另一方面可以节约大量的资源能源,将成为我国经济社会快速发展的重要支撑。根据中国物资再生协会出版的《2009 中国再生资源综合利用年鉴》,2008 年我国电子废弃物回收利用总量为 259.7 万 t,累计减少 3926.7 万 t 固体废物、6992.6 万 t 废水和 14 万 t SO₂ (中国物资再生协会,2010)。此外,电子废弃物再生利用还具有显著节能效用,2008 年电子废弃物再生利用节能总量为 631.7 万 t 标准煤。因此,科学规范地回收利用这些电子废弃物,不仅能解决世界经济发展面临的自然资源短缺和枯竭问题,而且能够有效减少环境破坏和人体健康威胁,在环境保护方面起着非常积极和重要的作用。

三、电子废弃物回收利用情况

虽然自 2014 年以来,电子废弃物产生量增长迅猛,但是全球电子废弃物的回收利用并未呈现出快速增长的趋势。世界不同地区和国家电子废弃物回收处置比例也不同,其中最高的是欧盟,其次是中国和日本,再次是美国和加拿大,而澳大利亚电子废弃物的回收利用比例最低。

(一) 全球回收利用情况分析

联合国的统计数据显示,2019 年全球产生的电子废弃物仅有 17.4% 被回收;从 2014 年到 2019 年,虽然电子废弃物产生量增长了 21%,但其回收比例的增长不到 2% (Forti et al., 2020)。不同地区和国家电子废弃物回收比例也存在很大差异。

截止到 2019 年,非洲共产生了 290 万 t 的电子废弃物,其中 3 万 t 被收集和妥善回收,占比仅为 0.9%,是电子废弃物回收率最低的地区。其中,非洲南部国家(南非、博茨瓦纳、纳米比亚)共产生了 50 万 t 电子废弃物(人均 6.9kg),共回收 2 万 t,回收率为 4%,是整个非洲回收率最高的地区;非洲北部国家(埃及、阿尔及利亚、摩洛哥)共产生了 130 万 t 电子废弃物(人均 5.4kg),占整个非洲大陆总量的 44.83%,但是回收量和回收率为 0%,这反映出电子废弃物产生量和回收比例在非洲大陆不同国家之间存在着巨大差异。

2019 年美洲产生的 1310 万 t 电子废弃物的回收率为 9.4%。其中,北美地区(美国、加拿大)共产生了 770 万 t 电子废弃物(人均 20.9kg),回收量为 120 万 t,回收率为 15%,是美洲地区电子废弃物总产生量、人均产生量和回收率最高的地区;美洲南部国家(巴西、阿根廷、哥伦比亚)共产生了 390 万 t 电子废弃物(人均 9.1kg),回收总量为 3 万 t,回收率为 0.7%,其电子废弃物总产生量、人均产生量和回收率居整个美洲大陆第二位。

2019年亚洲产生的2490万t电子废弃物的回收率为11.7%，其中东亚地区(中国、日本、韩国)产生了1370万t电子废弃物，回收量为270万t，回收率为20%，电子废弃物总产量、回收率都处于亚洲首位。

2019年欧洲产生的1200万t电子废弃物的回收率为42.5%，是电子废弃物回收率最高的地区。其中西欧国家(德国、法国、荷兰)产生了400万t电子废弃物，回收量为210万t，回收率为54%，低于回收率为59%的北欧国家(瑞典、挪威)。

2019年大洋洲产生的70万t电子废弃物的回收率为8.8%，主要来自澳大利亚和新西兰。

(二) 典型发达国家和地区回收利用情况

1. 美国

美国每年电子废弃物的产生量达到690万t，占城市垃圾总量的3%(Forti et al., 2020)。美国国家环境保护局(USEPA)报告，每年约有142000台电脑，超过416000部手机被废弃，只有27%左右被回收利用(USEPA, 2011)。此外，美国的电子废弃物有50%~80%流入了发展中国家(Khan et al., 2014)。全美有超过550个经过官方认证的电子废弃物回收处理企业，但是这些电子废弃物即使进入官方认可的回收中心，也很难追踪其去向。美国虽然也采用生产者责任延伸(extended producer responsibility, EPR)制度，但是在电子废弃物基础设施建设方面远远落后于其他发达国家。

2. 日本

2019年日本电子废弃物产生量约为250万t，占亚洲电子废弃物总产量的10%，其中7%是手机、计算器、电脑和打印机。由于日本自然资源匮乏，长久以来非常重视电子废弃物的再使用和再利用，所以日本是最早一批进行电子废弃物回收利用的国家，其开发利用系统比很多国家完善和发达。但是，日本仍然只能处理24%~30%的电子废弃物(Life Cycle Assessment Society of Japan, 2013)。

3. 欧盟

欧盟的电子废弃物中，电冰箱和空调的回收利用率达到27%，大型家电为40%，信息技术设备为28%，CRT电视为30%，监控设备为65%。欧盟回收的电子废弃物中有33%被妥当地处理，13%在欧盟内部作为垃圾被填埋，而剩下的54%流入其他国家(Yoshida and Yoshida, 2010)。

（三）典型发展中国家回收利用情况

1. 中国

中国的电子废弃物产生量约占全球电子废弃物总产量的 20%(Van Yken et al., 2021), 是全球电子废弃物产生量最大的国家, 每年报废的主要电器数量达 2 亿台之多, 重量达到 500 万 t。以“四机一脑”为主要统计口径, 2021 年电子废弃物回收数量为 2.02 亿台, 同比增长 9.2%, 总重量为 463 万 t, 同比增长 8.7%, 占再生资源回收总量的 1.22%。根据生态环境部发布的《2020 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报》, 2019 年中国有 109 家正规电子废弃物回收处理企业, 主要电子废弃物的年处理能力约 1.6 亿台, 但电子废弃物的回收利用率仍不到 20%。109 家处理企业中, 55%的企业由上市公司、集团公司、电器电子产品生产者组建, 其年处理能力占全国总处理能力的约 70%(张苗, 2022)。整体而言, 中国电子废弃物处理企业分布不均衡, 资源回收利用效率不高。

2. 印度

印度每年电子废弃物产生量约为 320 万 t, 其中大约 70%的电子废弃物来自政府、公共机构和私人企业, 只有 15%来自家庭(Awasthi et al., 2018)。另外, 每年约有 5 万 t 非法电子废弃物流入印度(Dwivedy and Mittal, 2012)。在印度只有 5%的电子废弃物通过正规回收渠道进行妥当处理, 而 95%的电子废弃物进入非正规部门(Awasthi et al., 2016)。印度 2012 年实施了与电子废弃物相关的法规, 要求生产者、回收利用者和拆解者进行登记, 提高了电子废弃物的回收利用率。2018 年印度有 178 家官方注册登记的回收处理和拆解企业, 而其中具备年处理量大于 5000t 能力的企业只有 27 家(Turaga and Bhaskar, 2017)。

3. 巴西

巴西是美洲仅次于美国的第二大电子废弃物产生国, 每年产生量约在 150 万 t(de Oliveira et al., 2012)。虽然巴西电子废弃物增长速度很快, 但是国家层面缺少有效的电子废弃物管理体系。据估计, 电子废弃物的回收处理率仅有 2%, 大部分电子废弃物被当作生活垃圾丢弃, 运送往垃圾填埋场, 或者被非正规部门回收处理。此外, 巴西也是发达国家非法出口电子废弃物的主要目的地之一。大量非法和不正规经营回收行为占据了巴西电子电器消费市场。