

环境污染源头控制与生态修复系列丛书

电子垃圾污染土壤修复

—— 重金属和有机物的同步洗脱去除

卢桂宁 杨行健 党志 黄开波 陶雪琴 张金莲 著



科学出版社

环境污染源头控制与生态修复系列丛书

电子垃圾污染土壤修复

——重金属和有机物的同步洗脱去除

卢桂宁 杨行健 党志 黄开波 陶雪琴 张金莲 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部关于电子垃圾污染土壤淋洗修复的重金属和持久性有机污染物同步洗脱去除技术研究成果的专著。在简单介绍了电子垃圾污染现状和污染土壤淋洗修复技术原理的基础上,系统总结作者及其研究团队针对电子垃圾拆解场地中重度重金属和持久性有机污染物复合污染土壤开展的环境友好型高效淋洗技术研发,以及洗脱废液中污染物选择性去除技术研发等方面的成果。这些研究成果可为电子垃圾污染土壤的修复提供科学依据和技术支持。

本书可供环境科学与工程、土壤污染控制与修复、化学工程与技术、资源循环科学与工程、环境地球科学等学科的科研人员,生态环境部门与节能环保产业的工程技术与管理人 员,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子垃圾污染土壤修复:重金属和有机物的同步洗脱去除 / 卢桂宁等著. —北京:科学出版社, 2020.1

(环境污染源头控制与生态修复系列丛书)

ISBN 978-7-03-062769-8

I. ①电… II. ①卢… III. ①电子产品-重金属污染-污染土壤-修复 IV. ①X53

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第242897号

责任编辑:万群霞 高 薇 / 责任校对:王萌萌

责任印制:吴兆东 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2020年1月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:316 000

定价:148.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

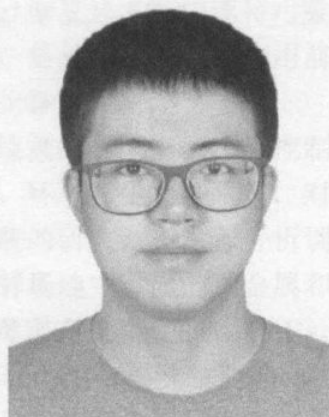
主要作者简介



卢桂宁 1980年生，广东和平人，华南理工大学和美国罗格斯大学(Rutgers University)联合培养环境工程专业博士，华南理工大学研究员、博士生导师，广东省自然科学基金、广东省优秀博士学位论文奖和中国环境科学学会青年科技奖获得者，入选教育部新世纪优秀人才、“广东特支计划”科技创新青年拔尖人才和广州市珠江科技新星。主要围绕“两区+农田”(电子垃圾拆解区、金属硫化物矿区及其周边受污染农田)开展“源头控制”与“末端修复”并重的研究工作。主持国家自然科学基金、中国博士后科学基金、教育部博士

点基金、广东省科技计划等科研项目 20 余项。发表学术论文 160 余篇(SCI 收录 110 余篇)、申请发明专利 20 余项(已获授权 13 项)。研究成果获教育部高等学校科学研究优秀成果奖自然科学奖一等奖、广东省科学技术奖自然科学奖一等奖、广东省环境保护科学技术奖一等奖等。

杨行健 1988年生，河南荥阳人，华南理工大学和美国华盛顿大学(University of Washington)联合培养环境科学与工程专业博士，华南农业大学副教授。主要从事环境新兴有机污染物(激素、抗生素、多溴联苯醚等)的迁移转化及有机污染土壤修复方面的研究工作。主持国家自然科学基金 1 项、国家重点研发计划项目子课题 1 项，参与完成国家高技术研究发展计划(863 计划)项目、国家自然科学基金、美国农业部基金等科研项目多项，攻读博士期间连续三年获校优秀博士论文创新基金资助，在 *Chemical Engineering Journal*、*Environmental Pollution*、*Science of the Total Environment*、《环境科学研究》等国内外期刊发表论文 10 余篇(SCI 收录 8 篇)、申请发明专利 1 项，参编了《环境科学与工程通识教程》《广东节能环保产业及促进政策研究》等书籍。





党志 1962年生，陕西蒲城人，中国科学院地球化学研究所和英国牛津布鲁克斯大学(Oxford Brookes University)联合培养环境地球化学专业理学博士，华南理工大学二级教授、博士生导师，工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室主任，享受国务院政府特殊津贴专家。主要从事金属矿区污染源头控制与生态修复、重金属及有机物污染场地/水体修复理论与技术、毒害污染物环境风险防控与应急处置等方面的研究工作。先后主持承担了国家重点研发计划重点专项项目、

国家自然科学基金重点项目和重点国际(地区)合作研究项目、广东省应用型科技研发专项等科研项目 60 余项。在国内外期刊发表论文 400 余篇(SCI 收录 270 余篇)，授权发明专利 20 余项。获得国家科学技术进步奖二等奖、教育部高等学校科学研究优秀成果奖自然科学奖一等奖、广东省科学技术奖自然科学奖一等奖、全国优秀环境科技工作者奖等奖励。

序

电子垃圾污染是近 20 年来国内外环境界关注的热点问题之一。电子垃圾的化学成分复杂,除了含有大量可回收利用的稀贵金属外,也含有大量有毒重金属(如 Cu、Pb、Cd、Zn 等)和持久性有机污染物(POPs),包括多氯联苯(PCBs)、多环芳烃(PAHs)、多溴联苯醚(PBDEs)和多氯二苯并二噁英及呋喃(PCDD/Fs)等。由于缺乏先进的技术和设备,电子垃圾的简单拆解会释放大量的重金属和持久性有机污染物,引起周围水体、大气、土壤乃至生物的复合污染。21 世纪以来,我国浙江省台州市、广东省汕头市贵屿镇和清远市龙塘镇、石角镇等典型电子垃圾拆解集散地相继出现了严重的环境污染问题,电子垃圾拆解场地及周边土壤等环境介质中重金属和有机污染物的含量普遍偏高。

污染土壤修复技术可概括为两类:一类以降低污染风险为目的,即通过改变污染物在土壤中的存在形态或与土壤的结合方式,以降低其在环境中的可迁移性与生物可利用性;另一类以削减污染总量为目的,即通过处理将有害物质从土壤中去掉,以降低土壤中有毒物质的总浓度。基于上述基本目的,人们研发了物理、化学、生物和农艺调控等多种修复技术。相比而言,基于污染物去除的修复技术能彻底清除土壤中的污染物,防止污染物的再次释放。电子垃圾污染土壤中多种重金属和毒害有机污染物共存,污染物种类繁多、含量高、毒性高、生态风险大。此外,污染场地中除了重金属和传统有机污染物外,还存在多种新型有机污染物,修复难度相当大。土壤淋洗(soil leaching flushing /washing)修复技术可快速将污染物从土壤中移除,短时间内完成高浓度污染土壤的治理,是具有很大市场应用前景的污染土壤快速修复技术,在国外已有一些成功的商业修复案例。

华南理工大学环境与能源学院生态修复团队以电子垃圾拆解区土壤污染控制与修复为核心,结合环境科学与工程、化学工程与技术、环境微生物技术等,对电子垃圾拆解场地及周边污染土壤的绿色修复开展了系统的研究。在深入分析调查电子垃圾拆解区污染特征的基础上,针对电子垃圾拆解场地中重度的重金属和有机物复合污染土壤,开展了典型重金属(Cu、Pb、Cd)和毒害有机物(PCBs、PAHs、PBDEs)污染土壤的同步洗脱研究,筛选出以柠檬酸为代表的重金属洗脱药剂、以非离子表面活性剂吐温 80(Tween 80, TW-80)为代表的疏水性有机污染物洗脱药剂及以生物表面活性剂皂素(saponin)为代表的重金属-PCBs 复合污染洗脱药剂。在此基础上将柠檬酸、吐温 80 和皂素进行复配,研制了可同步脱除土壤中重金属和 PCBs 的复合淋洗剂,对土壤中 Cu、Pb、Cd 和 PCBs 的单次洗脱率均在 80%

以上；针对洗脱后的废液处理和淋洗剂的回收利用问题，研发了粉末活性炭选择性吸附去除污染物和回收淋洗液的技术。研究成果为电子垃圾拆解场地及周边污染土壤修复提供了科学依据和技术支撑。

该书以电子垃圾拆解场地及周边土壤中重金属和持久性有机污染物的淋洗去除为主线，阐述了电子垃圾拆解场地及周边土壤的污染现状及淋洗修复技术原理与应用；介绍了重金属和 PCBs 淋洗剂的筛选与复合、疏水性有机物增溶洗脱技术及机理、洗脱废液中污染物选择性去除与淋洗液回用技术等；重点介绍了天然螯合剂和表面活性剂复配淋洗剂用于同步洗脱去除土壤中重金属和持久性有机污染物方面的研究成果。该书的出版将对推动我国电子垃圾污染土壤修复技术的发展与应用起到积极作用。

2018年12月于广州

前 言

电子电器产品是 20 世纪增长最快的产品之一，随着电子技术的发展与革新，电子产品更新速率也越来越快，而它们的使用寿命相应会缩短，这使电子垃圾的数量翻倍增长。作为资源的综合体，电子垃圾中蕴藏着众多珍贵的资源，对电子垃圾的再利用、循环利用是解决资源紧缺及环境污染等问题的重要途径。提高资源利用率，变废为宝，充分发挥包括电子垃圾在内的各类废物资源的作用，成为支撑经济社会快速发展的方式之一。但是，电子垃圾中也含有大量的有毒重金属（如 Cu、Pb、Cd、Zn、Cr、Ni 等）和持久性有机污染物（如 PCBs、PAHs、PBDEs 等），由于电子垃圾回收处理方式的不完善，大量有毒有害物质进入不同的环境介质中，带来了严重的环境污染问题，威胁着人类健康和生态安全。

选择科学合理的修复技术是治理电子垃圾污染的关键因素之一。目前国内外对电子垃圾污染土壤的研究主要集中在污染物调查、暴露水平和风险评估方面，而对电子垃圾污染场地的修复研究尚不多。与一般的工业场地污染相比，电子垃圾拆解区的污染土壤有其特殊之处，呈现多种毒害重金属和持久性有机物共存的特点，这两类不同性质的物质共存会产生多种交互作用，使修复难度大大增加。土壤淋洗修复技术由于具有操作简便、可控性好、修复速率快和处理条件温和等优点，在小面积、高浓度污染场地土壤修复中受到很大重视，已成为重度重金属和有机物复合污染的电子垃圾拆解场地修复的主要技术之一。近十多年来，笔者在国家重点研发计划、国家高技术研究发展计划（863 计划）、国家自然科学基金、广东省自然科学基金和广东省科技计划项目等资助下，以典型电子垃圾拆解区的污染土壤修复为目标，针对重度重金属和持久性有机物复合污染的拆解场地土壤，开展了重金属和持久性有机污染物的同步洗脱修复技术研究，形成了一系列较为系统的研究成果。本书是上述研究成果的归纳与总结。

本书的研究成果和撰写出版是在华南理工大学生态修复课题组党志、卢桂宁、杨琛、易筱筠、郭楚玲等老师和所指导的数届博士及硕士生的大力支持和共同努力下完成的，他们的科学实验、学位论文及与笔者共同发表的科研论文是本书写作的基础。全书共 8 章，第 1 章介绍电子垃圾污染及其控制，包含了丁疆峰、林浩忠、王锐等研究生的部分工作，张金莲高级实验师（广西大学原副教授）参加并指导了电子垃圾拆解区的污染调查工作；第 2 章总结污染土壤淋洗修复技术原理与应用，由卢桂宁负责整理完成；第 3 章介绍重金属淋洗剂的筛选与性能研究，主要研究工作由邢宇完成；第 4 章介绍多氯联苯淋洗剂的筛选与性能研究，主要

研究工作由张方立完成；第5章介绍氯代芳香有机污染物溶解与洗脱性能的模式预测，主要研究工作由卢桂宁和张方立完成；第6章介绍多溴联苯醚与多环芳烃增溶解吸技术与应用，主要研究工作由杨行健完成；第7章介绍重金属-多氯联苯复合污染土壤同步洗脱技术，主要研究工作由孙贝丽和廖侃完成；第8章介绍洗脱废液中污染物的选择性去除技术，主要研究工作由黄开波、郑雄开、曾宇飞、邓冰露和袁薇完成，周兴求教授参与并指导了多氯联苯的吸附去除技术研究，陶雪琴副教授参与并指导了重金属的选择性去除技术研究。全书由卢桂宁、杨行健、党志、黄开波、陶雪琴和张金莲负责总体设计、统稿和审校工作，参与本书资料收集与整理工作的还有王锐、唐婷、梁承豪、刘鹤、丁翠等博士和硕士研究生。

本书是国家“十二五”期间863计划资源环境技术领域重大项目“污染土壤修复技术及示范(一)”第3课题“电子垃圾拆解场地重金属-有机污染物协同控制与生物修复技术与示范”(2012AA06A203)、广东省高等学校科技创新项目“电子垃圾拆解区场地土壤复合污染的快速修复关键技术”(2013KJCX0015)和广东省科技计划项目社会发展领域项目“电子垃圾拆解区重金属-有机物复合污染场地土壤同步洗脱修复技术研究”(2014A020216004)的主要成果之一，也包含了国家自然科学基金项目“电子垃圾污染土壤淋洗废液中多溴联苯醚的光降解去除机理及调控机制”(41771346)、广东省自然科学基金杰出青年项目“电子垃圾拆解区稻田土壤中多溴联苯醚还原脱溴与矿化脱毒的过程耦合与调控机制”(2015A030306005)等部分成果。研究工作开展期间，笔者还得到了“广东省高层次人才特殊支持计划科技创新青年拔尖人才”(2015TQ01Z233)和“教育部新世纪优秀人才支持计划”(NCET-12-0199)项目的资助，特此感谢！此外，在本书的撰写过程中参阅了大量的相关专著和文献，并已列于书后，在此向各位著者表示诚挚的感谢！

由于笔者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请广大同行专家、学者和读者批评指正。

最后，衷心感谢朱利中院士在百忙之中为本书作序！

卢桂宁

2019年3月于广州

目 录

序	
前言	
第 1 章 电子垃圾污染及其控制	1
1.1 电子垃圾的源与汇	2
1.1.1 电子垃圾的产生	2
1.1.2 电子垃圾的特性	3
1.1.3 电子垃圾的去向	5
1.1.4 电子垃圾的处理	6
1.2 电子垃圾污染现状	6
1.2.1 重金属污染	6
1.2.2 持久性有机物污染	12
1.2.3 微生物多样性变化	21
1.3 电子垃圾污染控制	28
1.3.1 电子垃圾的管理与污染源头控制	28
1.3.2 电子垃圾污染土壤修复技术研发	30
第 2 章 污染土壤淋洗修复技术原理与应用	32
2.1 土壤淋洗技术原理	32
2.2 土壤淋洗技术分类	33
2.2.1 按处理土壤的位置分类	34
2.2.2 按淋洗液分类	35
2.2.3 按运行方式分类	39
2.3 土壤淋洗影响因素	41
2.3.1 土壤质地与组成	41
2.3.2 污染物类型及赋存状态	42
2.3.3 淋洗剂种类及浓度	43
2.3.4 淋洗操作工艺条件	43
2.3.5 外加强化措施	45
2.4 土壤淋洗技术应用与展望	48
2.4.1 技术成本	48
2.4.2 应用实例	49

2.4.3	技术展望	52
第 3 章	重金属淋洗剂的筛选与性能研究	53
3.1	重金属淋洗剂的筛选	53
3.1.1	实验土壤的制备与表征	54
3.1.2	不同淋洗剂的洗脱效果	54
3.2	重金属淋洗效果影响因素	56
3.2.1	淋洗剂浓度	56
3.2.2	淋洗液 pH	57
3.2.3	淋洗振荡时间	58
3.2.4	共存电解质浓度	58
3.2.5	土壤老化时间	59
3.2.6	重金属形态变化	60
3.2.7	重金属间相互作用	60
3.3	实际污染土壤的淋洗	62
3.3.1	污染土壤来源及特性	62
3.3.2	柠檬酸的洗脱效果	62
3.4	柠檬酸的淋洗动力学	63
3.4.1	淋洗动力学模型类别	63
3.4.2	淋洗动力学模型拟合	65
第 4 章	多氯联苯淋洗剂的筛选与性能研究	67
4.1	多氯联苯淋洗剂的筛选	68
4.1.1	实验土壤的制备与表征	68
4.1.2	不同淋洗剂的洗脱效果	69
4.1.3	淋洗剂在土壤中的吸附	70
4.2	多氯联苯淋洗效果影响因素	72
4.2.1	淋洗时间	72
4.2.2	淋洗次数	73
4.2.3	淋洗液 pH	74
4.3	多氯联苯污染土壤的土柱淋洗	75
4.3.1	土柱孔隙体积测定	75
4.3.2	淋洗速率的影响	76
4.3.3	淋洗方式的影响	78
4.3.4	残留多氯联苯的纵向分布	79
4.3.5	实际污染土壤的洗脱效果	80

第 5 章 氯代芳香有机污染物溶解与洗脱性能的模型预测	81
5.1 PCDD/Fs 溶解性能构效关系	83
5.1.1 PCDD/Fs 污染及修复研究现状	83
5.1.2 数据来源与研究方法	84
5.1.3 模型的建立和优化	87
5.1.4 模型的验证和应用	88
5.2 PCBs 正辛醇-水分配系数构效关系	93
5.2.1 数据来源与研究方法	93
5.2.2 模型的建立和优化	96
5.2.3 模型的验证和应用	97
5.3 PCBs 胶束-水分配系数构效关系	99
5.3.1 增溶实验及数据的获得	100
5.3.2 模型的建立和优化	101
5.3.3 模型的验证和应用	101
5.4 PCBs 胶束-水分配系数与正辛醇-水分配系数的相关性	102
第 6 章 多溴联苯醚与多环芳烃增溶溶解技术与应用	104
6.1 索氏提取-液相色谱法测定土壤中的多溴联苯醚	105
6.1.1 样品采集与方法	105
6.1.2 溶剂对 BDE-209 峰面积的影响	105
6.1.3 方法可行性验证	107
6.1.4 质量控制与质量保证	108
6.2 TX-100 和助溶剂对 BDE-15 的增溶与洗脱	109
6.2.1 表面活性剂的筛选	109
6.2.2 TX-100 对 BDE-15 的增溶动力学	112
6.2.3 TX-100 和醇类对 BDE-15 的增溶过程	113
6.2.4 TX-100/助溶剂对 BDE-15 的洗脱过程	116
6.3 BDE-15 和 PAHs 在表面活性剂中的混合增溶效应	118
6.3.1 表面活性剂的选择与性质概述	118
6.3.2 表面活性剂的临界胶束浓度	118
6.3.3 BDE-15、萘和芘在表面活性剂中的竞争增溶	118
6.3.4 BDE-15、萘和芘在表面活性剂中的相互作用	127
6.4 BDE-15、萘和芘在曲拉通系列表面活性剂中的竞争增溶	128
6.4.1 表面活性剂的性质概述	128
6.4.2 萘、芘和 BDE-15 的单独增溶	129
6.4.3 萘、芘和 BDE-15 的混合增溶	131

6.4.4	萘、芘和 BDE-15 在胶束中的相互作用	136
6.5	BDE-15 和 PAHs 在表面活性剂中的混合增溶效应	137
6.5.1	Brij 表面活性剂的基本性质	137
6.5.2	低溴代联苯醚的单独增溶	137
6.5.3	低溴代联苯醚的混合增溶	138
6.5.4	PBDEs 和表面活性剂的绑定常数与 PBDEs 之间的相互作用	143
6.5.5	复合污染土壤洗脱与模型预测	144
第 7 章	重金属-多氯联苯复合污染土壤同步洗脱技术	148
7.1	电子垃圾拆解场地土壤复合污染概述	148
7.2	单一淋洗剂的同步洗脱性能比较	150
7.2.1	单一螯合剂对重金属和多氯联苯的洗脱效果	151
7.2.2	单一表面活性剂对重金属和多氯联苯的洗脱效果	152
7.2.3	两性淋洗剂对重金属和多氯联苯同步洗脱效果	153
7.3	高效同步洗脱复合淋洗剂的研制	156
7.3.1	复合淋洗剂同步洗脱技术研究现状	156
7.3.2	柠檬酸-吐温 80 二元复合淋洗剂	157
7.3.3	皂素-吐温 80 二元复合淋洗剂	167
7.3.4	皂素-吐温 80-柠檬酸三元复合淋洗剂	170
7.4	复合污染土壤模拟原位淋洗	174
7.4.1	模拟原位土柱实验装置	175
7.4.2	土砂比对洗脱效果的影响	175
7.4.3	淋洗液用量对洗脱效果的影响	178
7.4.4	流速对洗脱效果的影响	179
7.4.5	淋洗液分次添加对洗脱效果的影响	180
7.5	淋洗修复后土壤的环境效应	181
7.5.1	种子萌发情况	181
7.5.2	土壤微生物数量	183
第 8 章	洗脱废液中污染物的选择性去除技术	186
8.1	洗脱废液中多氯联苯的选择性去除技术	186
8.1.1	粉末活性炭对多氯联苯的吸附去除性能	187
8.1.2	多氯联苯吸附去除过程中淋洗剂的回收	192
8.2	洗脱废液中多溴联苯醚的光降解去除技术	195
8.2.1	多溴联苯醚和表面活性剂浓度对去除效果的影响	195
8.2.2	环境因素对多溴联苯醚去除的影响	199
8.2.3	共存物质对表面活性剂中 BDE-28 光降解的影响	202

8.2.4 多溴联苯醚在表面活性剂中的转化	205
8.2.5 多溴联苯醚去除过程中表面活性剂的回收	207
8.3 洗脱废液中重金属的选择性去除技术	208
8.3.1 硫化钠对重金属的选择性去除	208
8.3.2 硫化钠去除重金属后淋洗剂的回收	209
参考文献	211
附录：本书相关论文及专利成果	235

电子产品、电子元器件、设备及其零部件、元器件和其他该领域内产品、零部件的制造、销售、售后服务、维修等生产、流通、销售、使用、回收、处理等各个环节的污染防治。

电子产品产业是 20 世纪以来增长最快的产品之一，随着电子技术的发展与革新，电子产品更新换代的速度加快，相关产品使用周期与寿命会缩短，由此产生海量的电子垃圾，年增长率高达 3%~4%，远高于城市固体废物产生量的增长率。作为资源的综合体，电子垃圾中蕴藏着众多珍贵的资源。对电子垃圾的再利用、循环利用是解决资源紧缺及环境污染等问题的有效途径。通过提高资源利用率，变废为宝，充分发挥包括电子垃圾在内的各类废物资源的潜力，成为支撑经济社会快速发展的方式之一。然而，电子垃圾的成分复杂，其中半数以上的材料对人体有害，有些甚至是有毒的。由于全球贸易的原因，国内很多废物（如浙江台州黄岩、广东佛山南海黄涌镇和清远市龙塘镇、石角镇等）成了电子垃圾的拆解与回收，并逐步形成了成规模的产业带。但是，电子垃圾回收处置方式的不完善，导致大量持久性有毒物质进入不同的环境介质中，带来了严重的环境污染问题，威胁着人类健康和生态安全（陈遵亲等，2011；陈万基和徐庆忠，2013；Sung and Yi, 2014；Ayres et al., 2016）。

电子垃圾污染是近 20 年来国内外环境界持续关注的重要问题之一。2001 年 12 月，国际电子废物网络（Global e-waste Network, GAWN）和硅谷废物联盟（Silicon Valley Toxics Coalition, SVTC）联合向香港环保协会（中国香港绿色和平组织（Greenpeace China in Hong Kong）的支持下）分别组织了废物回收现状调查进行了现场调查，取样并分析了沿海河流的环境介质（包括水、沉积物、土壤）。这次调查所形成的报告首次比较详细地披露了进口电子垃圾处理处置过程对我国本土环境带来的严重污染（Porkon et al., 2002），引起了广泛的关注，随后关于电子垃圾行业情况文图资料快速增长的趋势（杨中宇等，2008；李旭和徐庆忠，2010）。2009 年 Science 杂志刊文 *The electronics revolution: from a wonderland to a wasteland*（Vignati et al., 2009），引起了巨大的反响，将国际上对电子垃圾污染的关注推向高潮。

第 1 章 电子垃圾污染及其控制

电子垃圾(e-waste 或 electronic waste), 也称电子废物或电子废弃物, 全称废弃电器电子产品(waste electrical and electronic equipment, WEEE), 是指废弃的电器电子产品、电子电气设备及其废弃零部件、元器件和其他按规定纳入电子废物管理的物品、物质, 主要来源于电器电子产品的生产企业、维修服务企业和消费者。

电器电子产品是 20 世纪以来增长最快的产品之一, 随着电子技术的发展与革新, 电子产品更新速率也越来越快, 而它们的使用寿命相应会缩短, 由此产生巨量的电子垃圾, 年增长速率达 3%~8%, 远高于城市固体废物产生量的增长率。作为资源的综合体, 电子垃圾中蕴藏着众多珍贵的资源, 对电子垃圾的再利用、循环利用是解决资源紧缺及环境污染等问题的重要途径。通过提高资源利用率, 变废为宝, 充分发挥包括电子垃圾在内的各类废物资源的作用, 成为支撑经济社会快速发展的方式之一。然而, 电子垃圾的成分复杂, 其中半数以上的材料对人体有害, 有些甚至是剧毒的。由于丰厚利润的驱动, 国内很多乡镇(如浙江省台州市、广东省汕头市贵屿镇和清远市龙塘镇、石角镇等)兴起了电子垃圾的拆解与回收, 并逐步形成了成熟的产业链。但是, 电子垃圾回收处理方式的不完善, 导致大量持久性有毒物质进入不同的环境介质中, 带来了严重的环境污染问题, 威胁着人类健康和生态安全(傅建捷等, 2011; 周启星和林茂宏, 2013; Song and Li, 2014; Awasthi et al., 2016)。

电子垃圾污染是近 20 年来国内外环境界持续关注的话题之一。2001 年 12 月, 巴塞尔行动网络(Basel Action Network, BAN)和硅谷毒物联盟(Silicon Valley Toxics Coalition, SVTC)领导的调查委员会在中国香港绿色和平组织(Greenpeace China in Hong Kong)的协助下对贵屿镇电子废物回收污染状况进行了现场调查, 取样并分析了沿贵屿镇河流的环境样品(包括水、沉积物、土壤), 该次调查所形成的报告首次比较详细地披露了进口电子垃圾处理处置过程对我国水土环境带来的严重污染(Puckett et al., 2002), 并引起了广泛的关注, 随后关于电子垃圾污染的论文出现持续增长的趋势(杨中艺等, 2008; 章玮和徐秋桐, 2016)。2009 年 *Science* 杂志刊文 *The electronics revolution: from e-wonderland to e-wasteland* (Ogunseitan et al., 2009), 引起了巨大的反响, 将国际上对电子垃圾污染的关注推向高潮。

1.1 电子垃圾的源与汇

1.1.1 电子垃圾的产生

我国《废弃电器电子产品处理污染控制技术规范》(HJ 527—2010)中指出,所谓废弃电器电子产品,即产品的拥有者不再使用且已经丢弃或放弃的电器电子产品[包括构成其产品的所有零(部)件、元(器)件和材料等],以及在生产、运输、销售过程中产生的不合格产品、报废产品和过期产品。我国在2008年制定了《废弃电器电子产品回收处理管理条例》(国务院令第551号),根据该条例,先后发布了《废弃电器电子产品处理目录(2010年版)》和《废弃电器电子产品处理目录(2014年版)》,最新处理目录涉及14类废弃电器电子产品,详见表1-1。

表 1-1 我国废弃电器电子产品处理目录(2014年版)

序号	产品名称	产品范围及定义
1	电冰箱	冷藏冷冻箱(柜)、冷冻箱(柜)、冷藏箱(柜),以及其他具有制冷系统、消耗能量以获取冷量的隔热箱体(容积 $\leq 800\text{L}$)
2	空气调节器	整体式空调器(窗式、穿墙式等)、分体式空调器(挂壁式、落地式等)、一拖多空调器等制冷量在14000W及以下(一拖多空调时,按室外机制冷量计算)的房间空气调节器具
3	吸油烟机	深型吸排油烟机、欧式塔型吸排油烟机、侧吸式吸排油烟机,以及其他安装在炉灶上部,用于收集、处理被污染空气的电动器具
4	洗衣机	波轮式洗衣机、滚筒式洗衣机、搅拌式洗衣机、脱水机及其他依靠机械作用洗涤衣物(含兼有干衣功能)的器具(干衣量 $\leq 10\text{kg}$)
5	电热水器	储水式电热水器、快热式电热水器,以及其他将电能转换为热能,并将热能传递给水,使水产生一定温度的器具(容量 $\leq 500\text{L}$)
6	燃气热水器	以燃气作为燃料,通过燃烧加热方式将热量传递到流经热交换器的冷水中以达到制备热水目的的一种燃气用具(热负荷 $\leq 70\text{kW}$)
7	打印机	激光打印机、喷墨打印机、针式打印机、热敏打印机,以及其他与计算机联机工作或利用云打印平台,将数字信息转换成文字和图像并以硬拷贝形式输出的设备,包括以打印功能为主,兼有其他功能的设备(印刷幅面 $< \text{A}2$,印刷速度 ≤ 80 张/min)
8	复印件	静电复印机、喷墨复印机和其他用各种不同成像过程产生原稿复印品的设备,包括以复印功能为主,兼有其他功能的设备(印刷幅面 $< \text{A}2$,印刷速度 ≤ 80 张/min)
9	传真机	利用扫描和光电变换技术,把文字、图表、相片等静止图像变换成电信号发送出去,接收时以记录形式获取复制稿的通信终端设备,包括以传真功能为主,兼有其他功能的设备
10	电视机	阴极射线管(黑白、彩色)电视机、等离子电视机、液晶电视机、OLED电视机、背投电视机、移动电视接收终端及其他含有电视调谐器(高频头)的用于接收信号并还原出图像和伴音的终端设备
11	监视器	阴极射线管(黑白、彩色)监视器、液晶监视器等以显示器件为核心组成的图像输出设备(不含高频头)
12	微型计算机	台式微型计算机(含一体机)和便携式微型计算机(含平板电脑、掌上电脑)等信息事务处理实体
13	移动通信手持机	GSM手持机、CDMA手持机、SCDMA手持机、3G手持机、4G手持机、小灵通等手持式的,通过蜂窝网络的电磁波发送或接收两地讲话或其他声音、图像、数据的设备
14	电话单机	PSTN普通电话机、网络电话机(IP电话机)、特种电话机及其他通信中实现声能与电能相互转换的用户设备

根据电器电子产品的使用目的,可以将电子垃圾的主要产生源分为社会源和工业源。社会源主要包括以家庭为单位的消费者、个体消费者、大量使用电器电子设备的企业和行政事业单位、个体电器电子设备维修点等;工业源则包括电器电子制造企业和电器电子设备大型维修服务企业。我国及东南亚部分国家的电子垃圾来源还包括国外发达国家的进口。

联合国下属的国际电信联盟、联合国大学及国际固体废物协会发布的《2017年全球电子垃圾监测报告》称:2016年全球共产生电子垃圾4470万t,人均6.1kg,较两年前增加了8%;预计到2021年,全世界可能会产生电子垃圾5220万t,人均6.8kg,这些垃圾主要来源于电冰箱、洗衣机和其他家用电器,但现在手机和电脑的废料也越来越多,此外每年还有大量的复印机、传真机、打印机等办公电子产品报废淘汰。该报告显示,2016年亚洲产生的电子垃圾总量最大(1820万t)、大洋洲最少(70万t),而欧洲、美洲和非洲产生的电子垃圾总量分别为1230万t、1130万t和220万t。其中,我国的电子垃圾产生量为721.1万t,约占全球产生量的16%,居世界第一位。电子垃圾产生量超过100万t的国家还有:美国629.5万t、日本213.9万t、印度197.5万t、德国188.4万t、英国163.2万t、巴西153.54万t、俄罗斯139.2万t、法国137.3万t、印度尼西亚127.4万t、意大利115.6万t。但从人均电子垃圾量来看,大洋洲又是最高的,为17.3kg;非洲最少,只有1.9kg;亚洲4.2kg;欧洲16.6kg;美洲11.6kg。据估计,2016年全球电子垃圾中可回收材料的价值为550亿美元,超过了大多数国家的国内生产总值(Baldé et al., 2017)。

1.1.2 电子垃圾的特性

电子垃圾之所以被全世界广泛关注,不仅仅是因为电子信息产业的高速发展,电子产品的数量快速增加,更为重要的是因为它本身的特性,包括电子垃圾的资源性、污染性及难处理性等(张明顺等,2016)。

1. 电子垃圾的增长性

随着电子产业的飞速发展,电子产品更新换代加速,越来越多的电器电子产品将不被使用,进入报废期。在欧盟(European Union, EU)历史上,电子垃圾每5年增长16%~28%,是城市固体废物年均产生量增长率的3倍;在中国和印度等发展中国家,尽管人均电子垃圾产生量还较低,但却以指数级增长。发达国家的“置换市场”和“高报废率”,以及发展中国家不断增长的“市场占有率”,使电子垃圾成为增长最快的废物流之一。据有关机构统计,从2013年起我国理论上每年报废1亿台以上的“四机一脑”电子产品(表1-2)。我国自2012年开始对“四机一脑”按台征收废弃电器电子产品处理基金,大力推动“四机一脑”的回收,使废弃电器电子产品回收处理企业接收的报废家电数量快速增长,2014年全