电子废物拆解场地复合污染土壤修复技术研究进展＊

薛成杰】，，方战强】，，井王炜。

（1•广东省华南师范大学环境学院，广东 广州560001；

2.广东省水环境生态治理与修复工程技术研究中心，广东广州560001；

3.广东省环境修复产业技术创新联盟，广东 广州560001 ；.生态环境部华南环境科学研究所，广东 广州510530）

摘要 电子废物拆解场地土壤中含有重金属、有机物等多种复杂污染物，对场地周围人群的健康与安全具有潜在威胁。 概述 了国内外复合污染土壤修复技术发展历程与研究现状，对比了化学修复、物理修复、生物修复技术在目标污染物、修复时间与修复效 果上的差异，指出复合污染修复是未来研究的主要方向，修复技术将向多种技术联合应用发展、向绿色环保方向发展，后期应针对电 子废物拆解场地土壤污染特征，开发出低成本、高效率、稳定性好、绿色安全的产业化技术。

关键词 复合污染 电子废物 技术联用 土壤修复

DOI： 1015985 力.cnki1001-3865202101019

**Review on remediation technology of composite polluted soil in electronic waste dismantling site** *XUE Chengjie1，，,*

*FANG Zhanqiang1，，, WANG Wei4. (* 1. *School of Environment*, *South China Normal University , Guangzhou Guangdong* 560001 ；*2.Guangdong Provincial Engineering Research Center of Water Environment Eco-management and R^^habilitation , Guangzhou Guangdong* 560001 *Guangdong Environmental Remediation Industry Technology Innovation Alliance , Guangzhou Guangdong* 560001 *； 4. South China Institute of Environmental Science , Ministry of Ecological Environment*, *Guangzhou Guangdong* 510530)

**Abstract**: Many kinds of complex pollutants remain in the soil of electronic dismantling site, including heavy

metals, organic compounds and so on. As such,it has a potential threat to the health and safety of people around the site. In this paper, the overseas and domestic development and research status of remediation technology for heavy metals and organic complex polluted soil were summarized. Meanwhile, the differences of chemical remediation, physical remediation and bioremediation in target pollutants > remediation time and remediation effect were compared. It is pointed out that remediation of compound po**l** ution was the main direction in the future and the remediation technology would develop towards the joint application of various technologies and green environmental protection. Finally, based on the characteristics of soil pollution in electronic dismantling site, it is necessary to develop industrialization technology with low cost high e **f**iciency good stability and green safety.

**Keywords**: compound pollution； e-waste； composite technology； soil remediation

第一作者：薛成杰,男,1995年生,硕士研究生,研究方向为场地污染土壤修复。＃通讯作者。

\* 国家重点研发计划项目（No.2018YFC1802802、No.2017YFD0801300）。

随着经济的发展，电子废物的产量逐年增加，电 子废物处理不当会造成环境的严重污染。电子废物 中含有大量金属 或 塑 料，可通过拆卸从电子废物中 回收有价值物质进行二次利用，然而电子废物拆解 过程中重金属Pb、Cu、Cd等会从电子器件进入土 壤，再经过雨水等作用进入水体，造成土壤与地下水 的污染，拆解过程中的热处理还会产生二噁英、多氯 联苯（PCBs）、多溴联苯醚（PBDEs）、多环芳烃 （PAHs）等大量有害物质，对周边人群健康造成潜 在威胁［1-2］。清远市龙塘镇电子废物拆解场地土壤 中的Cu、Zn、Pb、PBDEs和三溴二苯醚浓度远高于

当地土壤背景值［3］。贵屿市的露天电子废物拆解场 地土壤中PCBs、PBDEs和重金属等明显超标⑷。 电子废物拆解场地产生的污染不是单种污染物的污 染,通常包含了重金属与有机物等多种污染物,对周 边土壤、大气、水体质量造成严重影响。 与大气污染 和水体污染相比,土壤污染治理相对困难,造成了土 壤污染治理问题被搁置。 初期土壤污染研究只是针 对某种单一污染物的降解修复,无法处理由于电子 废物拆解造成的复杂的重金属与有机物的复合污 染。 由于复合污染的复杂性,化学修复、物理修复和 生物修复方法的结合使用成为未来的发展方向,本研究针对电子废物拆解场地复合污染特征， 对复合 污染土壤的修复技术方法进行对比总结，以期为后 续电子废物拆解场地土壤修复提供借鉴。

1. 复合污染土壤修复技术研究现状

电子废物拆解场地遭受重金属及有机物复合污 染，严重危害人体健康。目前，针对电子废物拆解场 地的复合污染， 行之有效的修复技术还比较匮乏 目前，常用的土壤修复技术包括化学修复、物理修 复、生物修复以及多种修复技术的联合施用等。土 壤修复技术从20世纪80年代开始一直持续发展, 但不同种类技术的发展历程不同，基于Web of Sci- ence（WOS）数据库检索，得到2010—2020年土壤修 复技术领域的研究热点。由图1 可见，近年来生物 炭吸附技术论文发表量多且增长率保持在50%以 上，是土壤修复领域的研究热点；热解修复技术在近 10年总发文量增长率高达40%以上，将会成为下一 个土壤修复技术研究热点；生物修复技术是利用生 物（一般是植物或微生物）的特性吸收、转移、降解土 壤中污染物的技术，该技术环保无害，不会造成二次 污染，但修复周期长，适用性差且修复效果不显著 论文发表量最大但论文增长率相对较低。除此之 外，物理修复技术以及化学淋洗、氧化还原等化学修 复技术也是土壤修复中经常使用的手段。

60「

■

\_ ■ 生物炭吸附

热解修复

4030



「物理修复化学淋洗化学修复

■ ■ ■

-皆动修复 . 氧忘还原

植物修复

生物修复

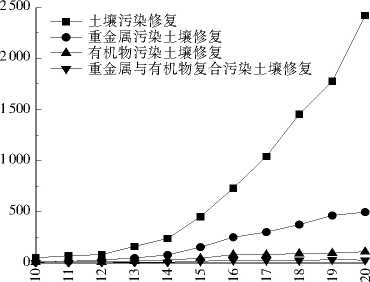
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900

**WOS**核心论文发表量/篇

图1 2010—2020年WOS 土壤修复技术发文情况

Fig.l Research papers of different soil remediation  
technologies in WOS during 2010-2020

2016年，我国多个地方电子废物拆解场地污染 事件被新闻报道，此后关于土壤修复的专利数量大 幅增加（见图2）。电子废物拆解场地土壤的污染类 型属于重金属与有机物的复合污染，多种重金属与 多种有机物混合在一起，污染程度严重，污染组分复 杂，针对此类污染土壤的修复技术没有成熟的研究 成果，电子废物拆解场地的复合污染土壤修复将成 为环境治理关注的热点。

1. 电子废物拆解场地修复技术研究进展 2．1 国内外修复技术发展历程

**00000000000**

**C4 O Z C4 O Z C4 O**

年份

图2中国不同污染类型土壤修复技术专利发表数量

Fig.2 Published patents of remediation technology for different types of polluted soil in China

士\*報蕉>

针对电子废物拆解场地污染土壤的修复，我国 目前没有完备的修复技术、政策、指南进行指导。国 际上，有关电子废物拆解场地土壤修复研究的论文 在20世纪60年代初开始陆续发表，截至2019年共 发表1 106篇，发展趋势大概分为3个阶段：第1阶 段为2012 年前，国际研究为滞涨阶段，论文数量从 1961 年的1 篇增加到2012 年的42 篇，同期国内对 该领域研究鲜有报道；第2阶段为2012—2017年, 国际研究进入成熟阶段，论文发表量稳中有升，国内 表现基本相同，但发文数量上与国际相比仍有一定 差距；第3 阶段为2017—2019 年，针对电子废物拆 解场地污染土壤修复的研究进入快速增长期，国际 论文平均发表量达到130 篇／年，这与我国重视电子 废物拆解场地污染有着十分紧密的关系，这一阶段 英文文献发表量主要由我国科研人员贡献（3 年合 计发表182 篇）。通过近年来该领域发文量的上升 趋势，可以反映出科研人员对电子废物拆解场地污 染土壤修复问题日益重视。

2．2 修复技术比较 2．2．1 化学修复及其联用技术

（1） 化学淋洗技术

化学淋洗技术是利用淋洗剂将电子废物拆解场 地污染土壤中的重金属等污染物经过增溶作用分离 出来再进行处理的技术。化学淋洗技术研究广泛 已有成熟的案例应用于修复电子废物拆解场地重金 属污染或有机物与重金属复合污染土壤，目前的研 究主要集中在对淋洗剂的择优选取上，针对不同污 染物需要选择不同淋洗剂，也有一些应用广泛的淋 洗剂如乙二胺四乙酸(EDTA)、皂素、环糊精等旧。

表1 列出目前使用广泛的表面活性剂。早期针对淋 洗剂的研究主要集中在环糊精上，EHSAN等6利 用环糊精和EDTA作为淋洗剂去除土壤中PCBs和 重金属Cr、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni的联合污染；CHEN 等7以甲基-0-环糊精与茶皂素作为淋洗剂再添加 Mg0用超声波辅助淋洗处理电子废物拆解场地污染 土壤中 疏水性有机物 (HOCs， 如 PBDEs、PCBs、 PAHs 等)和重金属污染，取得了较好的效果。 总体 而言，化学淋洗技术在电子废物拆解场地复合污染 修复上具有比较突出的优势。

1. 氧化还原技术 氧化还原技术是指通过添加化学氧化剂如过硫 酸盐、双氧水等将土壤中有机物降解或改变结构从 而降低污染物迁移性和毒性的修复技术。 近年来对 于化学氧化剂种类、氧化过程以及增溶剂的研究从 未间断。 氧化还原技术在用于电子废物拆解场地联 合污染土壤修复时，可以通过加入螯合剂、增溶剂等 进一步固定重金属或去除有机物。YAN等8通过 Fe-EDTA/Fe乙二胺二琥珀酸(EDDS)活化的过硫 盐处理土壤中的萘和Cu.Pb.Zn,取得较好的实验 室效果。BEIYUAN等⑼采用过硫酸盐氧化与以环 糊精作为增溶剂的化学淋洗技术联用处理电子废物 拆解场地中的 Cu、Pb、PCBs 等，该联合技术对有机 物脱卤也有一定效果。
2. 化学固定技术

化学固定技术是通过施用化学固定/稳定化试 剂等与土壤中重金属发生反应，改变重金属形态，使 重金属向不易被利用的形态转变，以降低重金属对 植物及动物等的危害。 磷酸盐、石灰、沸石粉、羟基 磷灰石、磷酸二氢钙等都可以作为化学固定/稳定 剂，且对重金属普遍具有良好的稳定效果。

部分主流化学修复技术对比见表2。

2．2．2 物理修复及其联用技术

1. 换土、修建阻隔墙

换土、修建阻隔墙原理简单，效果好，修复周期 短，成为政府、企业土壤修复的首选技术。 广州清远 龙塘镇泗合村电子废弃物污染严重，当地政府将其作 为电子废物拆解场地土壤污染修复的示范点。 该示 范点首先将地表的电子垃圾进行清表工作，土地整平 后在污染区域建设地下渗透反应墙，对地下水进行阻 隔、收集、处理，再覆盖干净土进行回填、绿化，该技术 可以在短时间内对电子废物拆解场地的土壤与地下 水进行快速修复，使之恢复到污染前的状态。

1. 热解技术

热解技术是电子废物拆解场地土壤修复中的热

表1 部分表面活性剂的基本信息1)

Table1 Basicinformationofsometypicalsurfactan

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 表面活性剂 | 类型 | 分子式 | 相对分子量 |
| 辛基苯基聚氧乙烯醚(TX-100) | 非离子表面活性剂 | (CH3)3CCH2C(CH3)2C6H4(OCH2CH2)10OH | 646．85 |
| 十二烷基硫酸钠(SDS) | 阴离子表面活性剂 | CH3(CH2)11OSO3Na | 288．38 |
| 鼠李糖脂 | 非离子生物表面活性剂 | C32H58 O13 或 C26 H48 O9 | 504．60 或 650．80 |
| 十二烷基苯磺酸钠(SDBS) | 阴离子表面活性剂 | C18H29NaO3S | 348．48 |
| 烷基二苯醚二磺酸盐(Dowfax 8390) | 阴离子表面活性剂 | C28H40Na2O7S2 | 598．72 |
| 月桂醇聚氧乙烯醚(Brij-35) | 非离子表面活性剂 | C12H25 (OC2H4)23OH | 1198．00 |
| 聚山梨酯-80(Tween 80) | 非离子表面活性剂 | C64H124O26 | 1310．00 |
| 脂酞 | 两性生物表面活性剂 | NR |  |
| 聚氧乙烯月桂醚(Brij-98) | 非离子表面活性剂 | C18H35(OCH2CH2)20OH | 1149．50 |
| 皂素 | 非离子生物表面活性剂 | NR |  |

注：)NR表示没有具体的分子式。

表2 化学修复技术分析

Table2 Analysisofchemicaltechnologyrehabilitationtechnology

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 修复方法 | 目标污染物 | 修复材料 | 修复时间 | 修复效果 |
| 化学淋洗 | 芘、苯、蔥、克氏体、菲、PCBs、氯化苯酚、多 氯代二噁英/二苯并呋喃(PCDD/Fs)和 Cr、Cu、As、Pb、Cd、Ni、Cu 等重金属 | 皂素、鼠李糖脂、「S, S]-EDDS、  Brij98、Tween 80、柠檬酸等 | 较快 | 重金属去除效果好, 有机物去除效果较好 |
| 氧化还原 | Pb、Cd、Cr、As等重金属；PAHs、三氯乙烷 (TCE)、PCBs等有机物 | 零价铁(ZVI)、生物炭、腐殖质、  Tween 80、柠檬酸、亚铁离子醌活 化过硫酸盐等 | 较快 | 有机物去除效果好, 重金属去除效果较好 |
| 化学固定 | Pb、Zn、Cd等重金属 | 生物胶体和磷酸盐等 | 快 | 有 效 固 定 Pb、 Zn、 Cd 等重金属 |

门技术。通过热解可使电子废物拆解场地土壤中 PAHs、PCBs等有机物从土壤中分离，辅以气体处 理装置实现污染去除。有研究表明，热解温度达到 550 °C时，土壤中有机物的去除率可以达到 96％［10］，但热解时氧气含量会影响热解产物种类， 可能会造成二次污染，后续的尾气处理问题需要引 起关注。

（3） 电动修复及其联用技术 电动修复技术主要针对土壤中的有机物，该技

术通过外加电源使有机物在阳极被降解，具有较好 的修复效果。但是电动修复技术在应用上有很多制 约因素，如修复成本高、能耗高，土壤性质发生改变， 土壤类型、土壤含水率可能影响修复效果等。针对 于电子废物拆解场地的复合污染土壤，单独使用电 动修复不能很好地同时去除重金属和有机物污染。 鉴于此，研究者尝试在电动修复中加入无机酸类、强 氧化剂、螯合剂等化学试剂［11-12］，以改善电动修复 应用的局限性。这种物理化学方法联用技术在应用 时可以原位修复，也可以进行异位修复，对于电子废 物拆解场地的修复具有一定适宜性。

（4） 生物炭吸附及其联用修复技术 生物炭作为一种土壤改良剂已有广泛的应用，

主要用于固定土壤中重金属和有机物，此外生物炭 不仅可以减少温室气体排放，还可改良土壤理化和 生物性状等。针对电子废物拆解场地复合污染土 壤，生物炭的作用主要是通过物理吸附、离子交换、 络合或化学沉淀等途径吸附重金属和有机物。当前 关于生物炭吸附技术的研究主要集中在生物炭材料 的制备和改性上，生物炭可以与ZVI、矿物材料、氧 化锌、二氧化锰等材料复合，合成材料具有静电吸 附、离子交换等间接作用与直接作用，对Cd、Cu、 Pb、Cr、As 等重金属和四环素、邻苯二甲酸二丁酯、 苯酚等有机物都有很好的吸附性能［13］，同时可以提 高土壤肥力 ［14］。

（5）机械化学修复技术

球磨是一种机械化学修复技术中的常用手段，该 技术可以在常温常压下通过高能碾磨产生巨大的机 械能为土壤组分引入特殊的性质，显著提高其化学反 应活性，使有机物被快速矿化。张金永等［15］使用球 磨技术在4 h内去除95% （质量分数）以上的总石油 烃（TPH）,且该技术有利于土壤中有机碳的增加。

部分主流物理修复技术对比见表3。

2.2.3 生物修复及其联用技术

（1） 微生物技术 微生物技术是利用微生物的生命代谢过程降解

有机物与固定重金属的技术。 微生物对重金属的修 复原理主要有生物富集（如生物积累、生物吸着）和 生物转化（如生物氧化还原、甲基化与去甲基化以及 重金属溶解、有机络合配位等）。 微生物修复研究工 作主要体现在筛选和驯化特异性高效降解微生物菌 株，提高功能微生物在土壤中的活性、寿命和安全 性，修复过程参数的优化和养分、温度、湿度等关键 因子的调控等方面。

（2） 植物修复技术

植物修复技术是利用植物根系作用吸附重金属 或者通过植物作用改变重金属化学形态，达到富集 重金属或固定重金属的作用，此类植物一般称为超 累积植物。 植物对有机物的治理是通过直接吸收或 释放分泌物和酶刺激微生物的活性加强有机物的生 物转化。 植物修复可与化学修复联合，通过添加化学 原料改变难降解有机物的结构从而提高植物对有机 物的降解。高园园［16］利用纳米零价铁（nZVI）强化凤 仙花与孔雀草修复Pb、Cd、PCBs污染土壤，nZVI的 加入引入强还原电势，可以实现PCBs脱氯。

（3） 微生物／植物联合修复技术 微生物／植物联合修复技术是利用微生物与植

物的互利共生关系，在促进植物生长的同时为微生 物提供营养，通过植物的吸收富集和微生物的新陈

表3物理修复技术分析

Table 3 Analysis of physical repair technology

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 修复方法 | 目标污染物 | 修复材料 | 修复时间 | 修复效果 | 备注 |
| 换土修复 | 土壤中所有污染物 | 置换未污染土壤 | 快 | 效果好，效率高，运输  成本高 | 没有根本解决污染问题 |
| 热解修复 | PCDD/Fs、五氯苯酚等有机物 或易挥发的金属Hg | 加热装置，高温 | 快 | 效果好，对有机物去  除率可达90%以上 | 能耗高 |
| 电动修复 | PAHs及其他碳氢化合物 | Ti/IrO2-Ta2O5  电极 | 快 | 效果 一 般，与 土壤 性 质有关 | 能源消耗大 |
| 生物炭吸附 | Cu、As、Cd等重金属及菲等有 机物 | 各种生物炭、改性  生物炭、磷酸盐 | 慢 | 效果一般，效率低 | 成本低，不改变土壤性质 |
| 机械化学修复 | As、Cd、Cr、Pb、PCBs、TPH 等 | 添加剂、CaO等 | 快 | 效果好，效率低 | 成本较高，操作简单 |

代谢固定土壤中的重金属，也可以与共生菌群一同 处理有机物，加入活化剂后修复效果可以进一步提 高。滕应等〔18〕在研究PCBs污染土壤过程中发现 接种苜蓿根瘤菌的根际土壤中细菌、真菌和联苯降 解菌数量有不同 程度提高，同 时根瘤菌能对多种 PCBs,特别对于低氯PCBs同系物有较强的降解转 化能力。 该技术在电子废物拆解场地复合污染土壤 修复上具有一定的应用前景。

（4）微生物燃料电池（MFC）技术

MFC是一种集细菌代谢和电化学过程为一体， 将化学能转化为电能的生物电化学系统。在MFC系 统中，有机物被附着在阳极上的微生物降解，电子通 过外部电路转移到阴极。目前利用MFC系统进行有 毒重金属修复的研究主要集中在土壤和废水方面，对 河流有机物和重金属污染同时进行原位修复的研究 较少［19］。 在电子废物拆解场地复合污染土壤修复 上, MFC对于类型相似污染物具有相近的修复效果。 2．2．4 修复技术发展态势评价

根据电子废物拆解场地土壤修复技术研究现 状、发展阶段以及技术优劣特点等，可以将主要的电 子废物拆解场地复合污染土壤修复技术分为3 大类 （见表4）：T类技术成熟，有规模产业化应用，该类 技术主要包含SVE、玻璃化、热脱附、植物强化等*；* 类技术研究广泛，正逐渐成熟， 已经在示范验证， 即 将进入规模化应用阶段，这类技术主要包括化学淋 洗、电动修复、植物萃取、生物炭固定等；B类技术目 前已有研究基础，但仍处于实验阶段，还需要验证才 能进入产业化，这类技术包括植物阻隔／萃取、植物 降解、微生物／植物联合修复等。

目前我国广东地区与浙江地区电子废物拆解场 地土壤复合污染严重，纳米修复材料、催化剂材料等 领域研究广泛，低成本高效率的修复材料制备是大势 所趋。 复合污染主要以异位修复为主，技术联用的研 究可以填补原位修复技术空白。 电子废物拆解场地 复合污染土壤的修复安全性应被重视，有些修复技术 在土壤修复过程中存在环境风险，使用前应评价修复 技术应用的环境效应，控制安全风险。 最后，应完善 电子废物拆解场地复合污染土壤修复技术的规范、指 南、评价标准等，研制具有自主知识产权的修复装备。

1. 电子废物拆解场地复合污染土壤修复发展趋势

从国内外土壤修复发展历程上看，土壤修复已 从污染物总量控制向污染物类别控制上转变， 在修 复技术上已经从单一的物理、化学、生物修复方法向 多种修复技术联用的方向发展；在对污染物的研究 上已经从单一有机污染物、重金属污染物控制发展 到多种有机物、多种重金属甚至有机物与重金属复 合污染控制转变；在应用上从异位物理化学修复到 原位无二次污染修复发展。 电子废物拆解场地污染 正成为一大类土壤污染环境问题，各国专家学者也 愈加重视这类污染造成的生态问题。

3．1 向技术联合应用发展

土壤中污染物种类越来越多，复合污染非常普 遍，各种物质组成混杂，污染治理难以用一种修复方 法或药剂就能实现。 单一方法通常只能治理单一污 染源造成的污染，面对多污染源需要使用多种修复 技术联合使用，几种适用于电子废物拆解场地复合 污染土壤的联用修复技术汇总见表5。

3．2 向绿色环保的修复技术发展

化学修复技术和物理修复技术都会对环境造成 二次污染或者影响土壤的原始性质，研究者一直在 研究新的化学试剂或物理方法使土壤修复过程中尽 量减少对生态造成的破坏，不产生二次污染源。 如 早期淋洗技术发展时很多学者都采用 EDTA 作为 络合剂对土壤中的重金属进行络合吸附以达到去除 重金属的目的，但是EDTA残留在土壤中产生的降 解产物会对环境造成二次污染，由此逐渐研究出新 型络合剂 EDDS［20］，EDDS 与 EDTA 结构类似，但 降解产物 对 环 境 无 害 ［21 ］。 利用生物或植物修复污 染土壤是一种更为绿色与环境友好的方法，这种方 法在农田土壤污染修复中较为常用。 在作物中筛选 出适合土壤修复的品种，用于大面积农田修复，植物 修复技术在经济和技术上都有较大优势，但是修复 时间较长。 ZVI 基材料不仅具有活性高、环境友好、 成本低等特性，还兼具吸附、还原、共沉淀等多重协 同作用机制，能有效应用于污染土壤修复与治理，基 于该材料及其衍生材料的修复技术已经受到国内外 研究者青睐。

表4电子废物拆解场地复合污染土壤修复技术分类

Table4 Classificationofremediationtechnologiesforcomplexpo**l**utionsoilofelectronicwastedismantlingsites

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项目 | T 类技术 | A 类技术 | B 类技术 |
| 国际 | 气体抽提（SVE）、玻璃化、热脱附 | 化学淋洗、原位氧化、电动修复 | 植物阻隔／萃取、植物降解 |
| 国内 | 热脱附／氧化还原、客土／换土、植物强化 | 化学淋洗、生物炭固定、植物萃取 | 电动力学、玻璃化、微生物／植物联合修复 |

表5电子废物拆解场地复合污染土壤的联用修复技术

Table 5 Analysis of combined remediation technology for combined pollution of electronic waste dismantling sites

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 联合修复技术 | 优点 | 缺点 | 应用可行性 |
| 化学—热解联用修复技术 | 可以对有机物进行快速降解，降低单一热  解修复成本 | 易改变土壤理化性质与使用功能 | 中高 |
| 电动—化学联用修复技术 | 重金属可以完全去除，可以原位或异位修  复，不破坏自然环境，经济效益高 | 对土壤类型有要求，适用于水力传导性  较低的土壤，如黏土 | 中 |
| 生物炭—化学联用修复技术 | 操作简单，二次污染小，对环境扰动小 | 修复周期较长，复合材料的大规模制备  仍受限 | 高 |
| 球磨—化学联用修复技术 | 对于难降解污染物有很好的去除效果 | 难以大范围工业化应用，能 耗高，成  本大  特定植物只降解或吸附某种污染物，污 | 低 |
| 化学淋洗—植物强化修复技术 | 可改善生态环境，操作过程简易 | 染浓度低时效果差， 淋洗剂易造成二次  污染 | 中 |
| 生物炭吸附—植物联用修复技术 | 二次污染小，成本低，可实现原位修复，绿  化环境 | 后期植株处理复杂，修复周期长 | 中高 |

4 结 语

目前我国对电子废物拆解场地所存在复合污染 及其修复技术的研究还极为缺乏。国际上对电子废 物拆解场地的研究也不够充分。针对电子废物拆解 场地的复合污染土壤，目前没有稳定可靠又快速的 修复方法，所有修复技术都处于研究阶段，当前应用 的技术还是异位换土等异位修复方法，亟待开发出 新的稳定可靠且高效经济的原位修复方法。目前， 我国政府已经意识到电子废物拆解场地复合污染土 壤修复的重要性，许多政策、法规、规范正逐渐形成， 有助于开发出低成本、高效率、稳定性好、绿色安全 的产业化修复技术。

参考文献：

1 叶景甲.台州原固体废物储存区PCBs和重金属污染特征及风 险评价[D].杭州：浙江工业大学,2015.

1. 吴晓飞.典型电子废物处置场地PBDEs污染特征研究:D**],**石 家庄**：**河北科技大学**,**2013．
2. WANG J,LIU L,WANG J,et al. Distribution of metals and brominatedflameretardants **(**BFRs**)**insediments**,**soilsand plantsfromaninformale-wastedismantlingsite**,**SouthChina CJ].Environmental Science and Pollution Research Internation- al**,**2015**,**22**(**2**)：**1020-1033.

**[]** LEUNG A O W, CHEUNG K C,WONG M II.Spatial distri- butionofpolycyclicaromatichydrocarbonsinsoil**,**sediment**,** andcombustedresidueatane-wasteprocessingsiteinsouth- eastChina**[**J**]**.EnvironmentalScienceand Po**l**ution Research International**,**2015**,**22**(**12**)：**8786-8801.

「5] LIU G,ZHONG H, YANG X,t al.Advances in applications of rhamnolpdsbosurfactantnenvronmentalremedaton**：**are- vew**[**J**]**.BotechnologyandBoengneerng**,**2018**,**115**：**796-814.

1. EHSANS**,**PRASHERSO**,**MARSHALL W D.Smultaneous mobilization of heavy metals and polychlorinated biphenyl (PCB**)** compounds from soil wth cyclodextrin and EDTA in admxture**[**J**]**.Chemosphere**,**2007**,**68**(**1**)：**150-158.
2. CHEN F**,**YANG B**,**MAJ**,**etal.Decontamnatonofelectronc waste-po**l**utedsolbyultrasound-assstedsolwashng**[**J**]**.En- vronmentalScence and Po**l**uton Research**,**2016**,**23**(**20**)：** 20331-20340.
3. YAN D YS**,**LOIM C.Removale**f**ectvenessand mechansms ofnaphthaleneandheavymetalsfromartfca**l**ycontamnated soil by iron chelate-activated persulfate^J],Environmental Pol- luton**,**2013 **,**178 **：**15-22.

[] BEIYUANJ,TSANG D C W/VALIX M,t al.Selective disso- lutonfo**l**owedbyEDDS washngofane-wastecontamnated soil: extraction efficiency / fate of residual metals / and impact onsolenvronment**[**J**]**.Chemosphere**,**2017**,**166**：**489-496.

1. CHANG M B,HSU Y C, CHANG S H.RemovalofPCDD／ Fs**,**PCPand mercuryfromsedments**:**thermaloxdatonver- suspyrolyss**[**J**]**.Chemosphere**,**2018**,**207**:**10-17.
2. BAHEMMAT M,FARAHBAKHSH M,KIANIRAD M.Hu- mcsubstances-enhancedelectroremedatonofheavy metals contamnatedsol**[**J**]**.Journalof Hazardous Materals**,**2016**,** 312:307-318.
3. AMMAMIM T,PORTET KOLTALO F,BENAMAR A,et al.Applcatonofbosurfactantsandperodcvoltagegradent for enhanced electro kinetic remediation of metals and PAHs indredged marinesediments**[**J**]**.Chemosphere**,**2015**,**125**:**1-8.
4. 蒲生彦,上官李想,刘世宾,等.生物炭及其复合材料在土壤污 染修复中的应用研究进展[]•生态环境学报，2019,28(3)： 205-211．
5. ZHANG X K,WANG H L,HE L Z,et al Usingbiochar for remediationofsoilscontaminated withheavy metalsandor- ganicpo**l**utants**[**J**]** EnvironmentalScienceandPo**l**utionRe- searchInternational**,**2013**,**20**(**12**):**8472-8483．
6. 张金永,叶倩,王明新,等．机械化学法修复柴油污染土壤的效 率、产物及影响「J/OL].环境科学学报，2021,41 (2)： 1-8 **[**2020-10-27**]** h**t**ps **／／**knscnkinet**／**kcms**／**detail**／**111843 x． 20201024．1157 ．003．html．
7. 高园园．纳米零价铁强化植物修复电子垃圾污染土壤的效果 和机理「D].天津：南开大学,014.
8. MENGHUA C,SHUXIN T,SHUANGLIAN X,etalEDDS enhancedPCB degradationand heavy metalsstabilizationin co-contaminatedsoils by ZVI under aerobic**[**J**]** Journalof Hazardous Materials**,**2018**,**358**：**265-272．
9. 滕应,骆永明,高军,等．多氯联苯污染土壤菌根真菌-紫花苜蓿- 根瘤菌联合修复效应口].环境科学,008,9(10):239-244.
10. JACOB J M，KARTHIK C，SARATALE R G， et al Biological approachestotackleheavymetalpo**l**ution**：**asurveyoflitera- ture**[**J**]** Journalof Environmental Management**，**2018**，**217**：** 56-70．
11. ULLMANN A，BRAUNER N，VAZANAS，etalNewbiode- gradableorganic-solublechelatingagentsforsimultaneousre- movalofheavy metals and organic po**l** utants from contami­nated media**[**J**]** Journalof Hazardous Materials**，**2013**，**260**：** 676-688．
12. CAO M, HU Y, SUN Q,et al. Enhanced desorption of PCB andtrace metalelements **(**Pb and Cu**)** from contaminated soilsbysaponinandEDDS mixedsolution**[**J**]** Environmental Po**l**ution2013**，**174**：**93-99．

编辑：丁 怀 (收稿日期：2020-11-27)