场地土壤污染物人体暴露组解析技术规范 废旧电子电器产品（征求意见稿）

编制说明

《场地土壤污染物人体暴露组解析技术规范》标准编制组

二零二四年六月

目 次

[1 工作简况 3](#_Toc116885833)

[2 制定标准的必要性 4](#_Toc116885836)

[3 国内外相关研究进展 5](#_Toc116885837)

[4 编制原则 6](#_Toc116885838)

[5 主要技术内容说明 6](#_Toc116885839)

[6 标准实施建议 20](#_Toc116885849)

# 工作简况

## 任务来源

废旧电子电器产品又被称电子垃圾。2013年，我国产生的电子电器废物总量在230万吨以上，废旧电子电器产品在堆放、拆解、加工、回收等过程形成了大量的污染区域或潜在污染区域。现有研究表明，废旧电子电器产品拆解、加工、回收区域大气、地表水、地下水、沉积物和土壤遭受有色金属、黑色金属和铅、汞、镉等重金属，以及塑料、氟氯化碳、聚乙烯联苯、多氯联苯（PCB）、多溴联苯（PBB）和多溴联苯醚（PBDEs）等有毒有害物质严重污染，对生态环境和公众健康构成了严重威胁。因此，亟需针对废旧电子电器行业场地土壤污染的潜在健康问题开展系统性研究，认清污染场地的污染物暴露风险源及其带来的健康危害效应，从而为相关行业的可持续发展与相关部门制定污染防治与污染物排放管控措施等提供重要的科学依据。

本项目针对上述现状着手编制了《场地土壤污染物人体暴露组解析技术规范 废旧电子电器产品》，本标准由中国环境科学学会提出并归口，2023年申请立项，由广东工业大学牵头起草。本文件将为我国废旧电子电器产品行业场地污染物人体暴露组解析提供基础技术支持，也为国家重点研发计划项目“重点行业场地土壤污染物的人体暴露组学与生物标志物，2019YFC1804500”和国家自然科学基金重点项目“电子垃圾拆解排放典型大气毒害有机污染物的环境地球化学转化过程及其人体代谢产物研究，41731279”在人体复合暴露组解析技术研发及其生物标志物筛选上提供基础支撑。

## 标准工作过程

本标准编制工作分以下几个阶段开展。

2022年9-11月，项目承担单位广东工业大学成立标准编制组。编制组基于国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项项目和国家自然科学基金重点项目“电子垃圾拆解排放典型大气毒害有机污染物的环境地球化学转化过程及其人体代谢产物研究”等研究成果，收集整理了国内外场地调查、土壤污染物风险评估以及人体暴露组解析技术研究成果及规范标准等资料，明确项目主持单位及各协作单位的具体分工，并组织优势力量和团队学术骨干制定了详细的工作计划，编写了标准大纲，启动标准的编制工作。

2022年12-2023年2月，标准编制组对收集到的研究资料进行筛选以及整理，系统开展国内外相关文献调研，针对《场地土壤污染物人体暴露组解析技术规范》（以下简称技术规范）标准总体定位、适用范围、编制思路、行业特点、场地污染暴露组解析和暴露标志物筛选的技术需求等问题召开研讨会，明确了拟开展的主要工作和需要解决的重大问题。

2023年3-8月，标准编制组召开多次内部研讨会和专家咨询会，根据专家意见对各关键点和难点进行修改和完善，形成《技术规范》（草案）及其编制说明，并向中国环境科学学会提交立项申请书。

2023年8月15日，中国环境科学学会组织召开《场地土壤污染物人体暴露组解析技术规范 废旧电子电器产品》等3 项团体标准的立项论证会，经专家组质询论证，一致同意通过立项评审。

2023年9月-2024年6月，标准编制组根据立项论证会意见开展《技术规范》编制修改工作，经多次召开内部研讨会和专家咨询会，讨论、修改和完善标准的文本和编制说明，形成《技术规范》（征求意见稿）及其编制说明，并提交中国环境科学学会。

# 制定标准的必要性

废旧电子电器产品在拆解、加工、回收、再利用和最终处理等过程，释放大量有毒、有害物质，如铅（Pb）、铬（Cr）、镉（Cd）、汞（Hg）、含溴阻燃剂等，对人体健康产生不利影响。现有研究表明，废旧电子电器产品拆解、加工、回收行业区域大气、地表水、地下水、沉积物和土壤遭受有色金属、黑色金属和铅、汞、镉等重金属，以及塑料、氟氯化碳、聚乙烯联苯、多氯联苯（PCB）、多溴联苯（PBB）和多溴联苯醚（PBDEs）等有毒有害物质严重污染，当地农作物、生物体中污染物的含量显著高于非拆解、加工、回收区域，对生态环境和公众健康构成了严重威胁。合理评价污染场地人群的暴露风险，对于废旧电子电器产品行业的可持续发展、制定行业污染管控政策、合理评价污染地块和功能定位、保障人群健康等具有重要的社会、经济和生态效益。

《土壤污染防治行动计划》、“十三五”生态环境保护规划等国家政策也提出加强土壤污染与人体健康关系研究，加快污染场地土壤污染的诊断、风险管控、治理与修复关键技术开发等要求。目前相关污染场地调查技术文件如《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3-2014）等主要针对环境中特定目标污染物的调查与监测，以及基于风险评估模型的暴露风险评估等进行了规范和要求。但由于污染场地土壤污染物的含量与人体暴露风险并不存在一一对应的关系，且具有污染物种类繁多、暴露途径多样、代谢转化机制不清等特点，从场地环境污染物含量即环境外暴露水平调查出发的暴露风险评估对保障人体健康的意义相对有限。如何突破现有健康风险评估模型，结合不同污染场地的特点，采用新技术解决我国废旧电子电器产品行业场地土壤污染的人群暴露风险问题，筛选合适的暴露标志物评价污染场地对人体的影响和危害具有重要意义。

生态环境部2018年公布的《工矿用地土壤环境管理办法（试行）》中指出，土壤环境污染重点监管单位包括：有色金属冶炼、石油加工、化工、焦化、电镀、制革等行业。由于重点监管行业类型较多，不同行业的有毒有害物质、环境风险特征等差异较大，在《场地土壤污染物人体暴露组解析技术规范 总纲》对污染场地土壤污染物人体暴露组解析技术的一般工作原则、工作程序、内容方法和质量评价等技术进行规范的基础上，有必要针对具体行业，在行业污染资料的收集、重点特征污染物识别、样品采集和分析方法的选择、结果分析判断等方面进一步细化要求，以帮助我国科研工作者更好的开展废旧电子电器行业污染场地的暴露组解析和风险评价工作，提高工作效率和质量。《固定污染源排污许可证分类管理名录（2017年版)》(环境保护部令 第45号）也明确规定“铜、铅锌、镍钴、锡、锑、铝、镁、汞、钛等常用有色金属冶炼（含再生铜、再生铝和再生铅冶炼)”为“实施重点管理的行业”。废旧电子电器产品行业作为重点监管行业和重点排污行业，对其污染场地土壤污染物人体暴露组解析技术做出单独规范对环境风险控制具有重要意义。

# 国内外相关研究进展

（1）污染物人体暴露与风险源识别

污染物暴露风险源识别是污染场地风险评估中最基础、最重要的环节之一，其主要目的是确定场地污染物的人体主要暴露路径与暴露途径。在暴露评估中，场地特征参数和人群暴露参数是影响结果不确定性的关键因素。目前，我国相关的研究基础比较薄弱，暴露模型中场地特征参数和暴露参数很多借鉴了国外研究成果。然而，不同区域地理因素、人群生活习惯、人群特征等实际情况的差异往往会导致评估结果不能真实反映我国特定污染场地情况。例如，若引用美国的数据，仅平均体重这一个参数就将造成5%~20%的偏差。目前场地土壤污染物暴露模型往往基于某种污染物的总浓度，忽略了污染物的赋存状态及其生物有效性。相关研究表明，土壤中某些污染物（例如，PAHs）的生物可利用浓度仅为其总浓度的0.6%~11%。然而，就目前为止，各类环境介质中污染物的生物有效性研究及其在暴露评估中的应用极为缺乏。也正因如此，在我国的《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3-2014）中，污染物暴露评估只能以100%作为经口摄入的吸收效率因子（生物有效性）。

（2）暴露解析技术

废旧电子电器产品行业场地污染物种类繁多，外源性化合物进入人体后，在生物代谢的作用下，生成小分子的代谢产物或大分子的加合物。采用传统的生物监测方法不足以全面反映场地暴露人群的总体暴露水平。暴露组生物监测主要通过非靶标设计，借鉴代谢组学的研究方法，利用高分辨、高通量以及痕量组分分析的质谱技术对人体样本中所有可能的暴露污染物及其代谢产物进行分析，从而能够全面的表征场地土壤污染物的人体暴露特征。美国和欧洲均已开展了暴露组学方面的研究；国际癌症研究机构（IARC）构建了第一个环境暴露相关的生物标志物数据库。而我国在这方面的相关研究仍处于起步阶段，废旧电子电器产品行业场地土壤污染物的人体暴露组学研究更是未有报道。

（3）生物标志物

环境污染物暴露可引起体内谷胱甘肽、半胱氨酸等生物标志物的变化，这些变化可用来反应系统、器官、组织、细胞及亚细胞结构或功能改变或可能发生的改变。然而，现有环境污染物导致的体内代谢等生理过程变化大部分集中在单一污染物暴露，缺乏指示多种污染物复合暴露的生物标志物。近年来，蛋白质组学与代谢组学等高通量检测分析方法已广泛用于生物标志物的识别与筛选，并用于环境污染与健康研究，解释环境因素与疾病的关系。

# 编制原则

本标准的编制主要遵循以下应遵循的基本原则：

1. 遵循国家有关的法规、标准和规范，体现标准的科学性、规范性和一致性，标准要和国家现有相关规范性文件相协调，避免冲突；
2. 突出废旧电子电器产品行业场地土壤污染物人体暴露解析的适用性和可操作性，应具备充分的理论科学基础和实际应用推广价值；
3. 充分考虑废旧电子电器产品行业场地初步调查、场地调查与人群调查，以及场地特征土壤污染物、人群体内负荷污染物、内源性代谢物与暴露生物标志物之间的衔接和关联，保证解析结果的可靠。

# 主要技术内容说明

## 5.1 层次框架

本标准正文由10部分组成，包括：

（1）范围；

（2）规范性引用文件；

（3）术语和定义；

（4）工作程序；

（5）初步调查；

（6）区域调查；

（7）人群调查；

（8）暴露生物标志物的确定；

（9）质量控制；

（10）报告编制。

## 5.2 技术要点

### 5.2.1 范围

本标准规定了有色金属工业场地土壤污染物人体暴露组学解析技术的工作程序、初步调查、场地调查、人群调查、暴露标志物筛选。适用于我国有色金属工业企业在生产、关停、搬迁过程中形成的污染场地中土壤污染物暴露人群的暴露组解析及暴露标志物筛选。

### 5.2.2 术语和定义

（1）家用电器 household electric appliance

指家用电器及类似用途产品，包括电视机、冰箱、空调、洗衣机、吸尘器等。

（2）电子产品 electronic product

指信息技术（IT）和通讯产品、办公设备，包括计算机、打印机、传真机、复印机、电话机等。

（3）废弃家用电器与电子产品 waste household appliances and electronic product

指已经失去使用价值或因使用价值不能满足要求而被丢弃的家用电器与电子产品，以及其元（器）件、零（部）件和耗材。

（4）粗放式的电子垃圾拆解 extensive e-waste dismantling

指用火烤电路板取出电子元件，用酸洗的方式提取贵重金属，剩余的边角料将被焚烧，用过的废酸排放到河流及田地中的活动。

（5）毒害污染物 toxic and harmful contaminants

指电器与电子产品中含有的铅、汞、镉、六价铬、多溴联苯（PBB）和多溴二苯醚（PBDEs）以及国家规定的其他有毒有害物质。

（6）拆解 disassembly

通过人工或机械的方式将废弃旧电子电器产品进行拆卸、解体，以便再生利用和处置的活动。

（7）再利用 recycle

指对废弃电器与电子产品或废弃材料的再加工，加工后材料的用途可与以前相同或不同，但不包括对废弃材料直接焚烧进行的热能回收。

（8）处理 treatment

指对废弃电子与电器产品清除污染、拆解、破碎、再利用的活动。

（9）处置 disposal

废弃电子与电器产品经处理后，产生的无法进一步再使用、再利用的残余物，采用焚烧、填埋或其他方式，以达到减容、减少或消除其危害性的活动。

（10）暴露 exposure

指一种及一种以上的生物、化学或物理因子与人体在时间和空间上的接触。

（11）暴露途径 exposure pathway

指污染物从源到与暴露受体接触的途径，主要包括污染物来源、环境归趋和传输、暴露地点、暴露方式（如消化道摄入、呼吸道吸入和皮肤吸收等）以及暴露人群等五部分内容。

（12）敏感目标 sensitive targets

指污染源周围可能受污染物影响的居民区、学校、医院、饮用水源保护区以及重要公共场所等。

（13）对照人群 controlled population

指未暴露于环境污染物的人群。

### 5.2.3 初步调查

初步调查是以资料收集、现场踏勘和人员访谈为主的污染识别阶段，原则上不进行现场采样分析。若第一阶段调查确认区域内及周围区域当前和历史上均无可能的污染源，则认为区域的环境状况可以接受，调查活动结束。

其中，资料收集主要包括场地基本资料、场地所在区域的自然、社会信息场地环境资料、工艺相关文件及工业污染信息等。参考《废弃电器电子产品处理污染控制技术规范》（HJ 527-2010）、《排污许可证申请与核发技术规范 电子工业》（HJ 81031-2019）等规范，本标准对废旧电子电器产品行业中重要污染环节和相关资料进行梳理，提出“表附录A和B 废旧电子电器产品行业污染信息建议收集的资料清单”，为开展废旧电子电器产品行业资料收集提供帮助。

现场踏勘主要是了解地块的现状与历史情况，相邻地块的现在与历史情况，周围区域的现状与历史情况等，明确污染的来源。重点踏勘对象一般应包括：电子垃圾拆解回收方法、电子垃圾的主要类型；电子垃圾回收工艺（物理机械拆解、线路板回收、塑料和金属回收）；线路板回收材料的应用；工业园区、废弃拆解地、手工拆解地、郊区、居民区、背景区等；废弃物回收过程（拆解、印制线路板加热、印制线路板回收和塑料破碎）等。

人员访谈主要是对资料收集与现场踏勘所涉及的疑问，通过访谈形式进行信息补充和资料考证。应对访谈内容进行整理，并对照已有资料，对其中可疑处和不完善处进行核实和补充，作为报告的附件。

在完成资料收集、现场踏勘、人员访谈后应进行结论与分析，明确场地内及周围区域存在的污染，说明可能的污染状况和来源，并确定暴露人群。若初步调查认为场地土壤未受污染或对人体健康未造成风险，则不需开展后续调查。

### 5.2.4 场地调查

场地环境调查是以环境样品采集分析为主的污染实证阶段，目的是确定场地的主要污染物种类、浓度（程度）、空间分布，获得场地土壤污染物清单及清单中污染物的暴露途径和暴露情景，结合人群流行病学及毒理学实验等资料，分析场地土壤污染物造成区域人群健康风险的可能性，判断是否需要开展人群调查并为人群调查中方案制定提供基础。

（1）确定调查范围

场地的调查范围主要受污染物的扩散影响范围决定，参考建设项目环境影响评价技术导则 总纲（HJ 2.1）、环境影响评价技术导则 大气环境（HJ 2.2）、环境影响评价技术导则 地表水环境（HJ 2.3），环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）（HJ 964），确定废旧电子电器产品拆解回收调查范围应设置为场地及其周边2.5 km范围内区域为暴露区，其他工艺应设置场地及其周边2 km范围内区域为暴露区。并应根据场地的具体情况、场地内外的污染源分布、水文地质条件以及污染物的迁移和转化等因素，判断场地土壤污染物的可能分布，对划定调查的区域（污染区）范围进行调整。暴露区包括场地及以场地为中心的周边潜在污染区域。根据土地使用情况，应将场地内划分为工业园区和生活区两个分区。工业园区中不同工艺划分情况与产排污节点决定了该区域的暴露特征。不同工业园区排放的潜在特征污染物情况存在差异。参考《关于禁止洋垃圾入境推进固体废物进口管理制度改革实施方案》、《废弃家用电器与电子产品污染防治技术政策》（环发[2006]115号）、《废弃电器电子产品处理污染控制技术规范》（HJ 527-2010）、《排污许可证申请与核发技术规范 电子工业》（HJ 81031-2019）等方案、政策和规范等资料，本标准对废旧电子电器产品拆解回收行业中主要产品类别及清单、废旧电子电器产品材料中含有毒有害物质种类等进行梳理，为识别暴露程度提供基础。

a) 电子垃圾中的多数电子器件，比如金属、塑料、玻璃、稀土金属、稀有金属以及线路板等仍具有很高的回收利用价值，除了上述具有高回收利用价值的二次元器件等基础工业原料和贵金属外，还含有其他大量的有毒有害的物质，如多溴联苯醚（PBDEs）、多氯联苯（PCBs）等。在电子垃圾拆解回收加热过程，同时会释放出大量的挥发性有机污染物（VOCs）和不完全燃烧产物多环芳烃（PAHs）。

b) 线路板：电子设备不可分割的重要部分，是所有电子产品的核心部件，不管是冰箱、洗衣机、电视和电脑等大型电子设备，还是手机、CD/DVD播放器、收音机、电动剃须刀、调制解调器和相机等小型电子设备。因此，废弃线路板在电子垃圾中所占比重很大（约为4 %），在手机、电脑和彩电中甚至高达21.3 %、18.7 %和7.0 %。

c) 工业电子垃圾拆解工艺：

物理机械拆解：用电钻、锤子、切割机和螺丝刀等将废弃电子产品上的各种电子部件（显示器、硬盘驱动器、光盘驱动器、电线、电缆、线路板、变压器、充电器、电池、塑料盒金属框架等）进行初步的分离拆解，并将拆解后的各种电子部件进行分类处理，直接二次回收利用或进入不同的电子回收作坊进行深度的回收。

线路板回收：使用研磨机磨掉线路板背面的焊锡，或通过化学溶剂、电子加热管和热流体等将焊锡熔融；然后通过机械振荡、气体喷流和离心分离等将各种电子元器件与线路板基板进行分离。目前，电子垃圾拆解地区线路板回收过程一般可分为以下三个步骤：①电脑和其他较大型电子设备的线路板浸没在盛有锡液的煤炉或电烤锡炉中加热，熔融电子元器件与基板之间的焊锡以回收二极管、电阻和芯片等；手机等其他便携式电子产品的线路板则通过电吹风加热熔融芯片周围的焊锡使其分离；②将熔融分离后的微芯片和电脑配件等浸泡在酸池中回收金和钯等贵金属；电线和电缆通过剥离或焚烧等工序回收其中的铜；将打印机内的墨盒及可回收的铝、钢和塑料等拆解分离；③已回收电子元器件后的各种线路板经过旋转灰化炉的高温燃烧，线路板上所有的焊点得到彻底熔融，元器件从灰化炉的筛孔露出，裸板再次高温焚烧以提炼其中的铜。

塑料和金属的回收：①根据塑料的表面特征（硬度、颜色和光泽等）将上述回收的塑料产品，如（聚氯乙烯(PVC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和高密度的聚乙烯（HDPE））进行分类，无法根据表面特征进行分类的塑料，则经过不同的重力或者燃烧后的味道进行分类，回收后的塑料进入破碎机中破碎至粉末后进行塑料的再生；②变压器、充电器、电池和阴极射像管破碎分离后回收其中的铜、钢、银、铝等金属，然后再加工成原材料。

d) 有机废气污染：电子垃圾拆解、加热等处理过程会产生大量的有机污染物，包括挥发性有机污染物及半挥发性的有机污染物，对当地的大气环境造成了严重的危害，而且对人体的健康构成了极大的威胁。

多溴联苯醚：一种常见的溴系阻燃剂，其化学通式为：C12H(0-9)Br(0-9)O，按照溴原子取代数量的不同分为10组，共有209种同分异构体。由于PBDEs热稳定性好、阻燃效率高、价格便宜等特性，因而广泛应用于电子电器制造、纺织品、家具、塑料、汽车内部材料、建筑材料等领域中。商业品PBDEs主要有五溴联苯醚（*Penta-BDE*）、八溴联苯醚（*Octa-BDE*）和十溴联苯醚（*Deca-BDE*）三种混合工业品。其中，*Penta-BDE*主要用于聚氨酯泡沫塑料和纺织中；*Octa-BDE*主要用于丙烯腈树脂中；*Deca-BDE*应用比较广泛，主要用于聚碳酸酯、聚酯树脂、聚烯烃、丙烯腈、聚酰胺、聚氯乙烯和橡胶中。

多氯联苯：联苯苯环上的氢原子被氯原子取代的芳烃化合物的总称，根据氯原子的数目和取代位置的不同，共有209种同分异构体。PCBs具有稳定的物理化学性质，在自然界中随着氯化程度的不同而呈现不同的存在状态，一般低氯代的PCBs是无色油状液体，五、六氯代的PCBs呈现粘稠状结晶，氯原子数更高的PCBs则为树脂状固体。由于其比热大、耐热性好、增速能力强、绝缘性能优越等特性，被广泛应用于塑料、印刷、油漆、电力等多种行业，尤其是作为绝缘液、隔热剂和增塑剂使用。

多环芳烃：由两个或两个以上苯环构成的碳氢化合物及各种衍生化合物的总称。按照其苯环连接方式的不同分为稠环和非稠环型两大类，其中稠环型是指相邻的苯环至少共享两个碳原子，即通常所说的多环芳烃，如萘、菲等；非稠环型是指相邻苯环之间通过单键连接，如联苯、三联苯等。常温下，PAHs是有颜色的结晶固体，其物理性质随着分子量和结构的不同而变化，蒸汽压和水溶性会随着分子量的增加而减小；PAHs具有高亲酯性，易溶于有机溶剂。此外，PAHs还具有光敏性、耐热性、导电性、应激性、抗腐蚀等特性；PAHs的毒性随着其分子量的增加而增加，而急性毒性反而降低。虽然不同的PAHs所引起的健康效应不同，鉴于其严重的致癌、致畸、致突变等毒性，美国环保署于70年代公布了16种优先控制的PAHs。

挥发性有机物：环境中普遍存在的一类重要的大气污染物。世界卫生组织（WHO）将其定义为沸点介于50 °C ~ 260 °C之间，常温常压下饱和蒸汽压超过133.3 kPa（0.1 mmHg），以气态形式存在的有机化合物。大气中VOCs种类繁多、成分复杂，根据其化学结构可以分为：烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、含氧VOCs（酯类、醛类、酮类、有机酸类等）和其他（硫醇、硫醚）等几大类。一般情况，我们所指的VOCs主要包括C2 ~ C10的非甲烷总烃、卤代烃和其他含有氧、氮、硫等杂原子的VOCs。

由于电子垃圾成分复杂，废气中VOCs的种类会随着热解的电子元器件的不同而变化，如热解电脑显示器外壳过程会产生大量的甲苯、乙苯和苯乙烯，而热解电脑显卡则释放出丙酮、苯酚和溴代甲苯等VOCs，这可能是不同的电子部件组成成分不同所致。此外，VOCs的种类和含量还会因热解温度而发生变化。当温度低于300 oC时，热解废旧印制电路板产生的废气以芳香烃VOCs为主，且随着温度的升高其生成的比例不断降低，高于400 oC时则有Br-VOCs生成；当热解温度为700 oC时，生成较高浓度的苯酚及酚类衍生物物，而且熔融温度越高，废旧塑料产生的VOCs含量越高。

e) 电子垃圾排放有机废气控制技术：

物理法：又称为回收技术，即通过制冷、加压或者采用选择性的吸附剂或渗透膜等分离富集有机污染物，比如吸附法、吸收法、冷凝法和膜分离法等。

化学法：指通过各种生化反应，用热、催化剂或者生物手段将废气中的有机化合物转变成CO2和H2O等无机小分子，主要包括高温焚烧法、催化燃烧法、生物净化法和光催化降解法等。

高温燃烧法：借助辅助燃料产生的高温将有机物转变成无机小分子的方法。

催化燃烧法：催化剂存在的条件下，在较低的燃烧温度下氧化分解有机废气中有机物质的方法，在此过程中，催化剂不仅降低反应物的活化能，而且为有机物质提供反应表面，从而提高催化反应，同时会释放出大量的热量。

生物净化法：微生物将废气中的各种有机物质作为自身代谢活动的能源和碳源，将各种有机质分解为CO2和H2O的过程。

光催化法：催化剂在可见光或紫外光等光照射下催化降解各种有机污染物的方法。

（2）废旧电子电器产品拆解回收行业重点关注污染物的确定

基于废旧电子电器产品原辅材料、产品及废水、废气、固废的成分分析，参考《关于禁止洋垃圾入境推进固体废物进口管理制度改革实施方案》、《废弃家用电器与电子产品污染防治技术政策》（环发[2006]115号）、《废弃电器电子产品处理污染控制技术规范》（HJ 527-2010）、《排污许可证申请与核发技术规范 电子工业》（HJ 81031-2019）等方案、政策和规范等资料相关内容，结合文献查阅，明确废旧电子电器产品拆解回收行业应重点关注有色金属（铝、铅、锌、铜、镍、钴、镁、钛、锡、锑、汞等）、黑色金属（铁、锰、铬等）、重金属（汞、镉、铅、铬、砷等）以及塑料、氟氯化碳、聚乙烯联苯、多氯联苯（PCB）、多溴联苯（PBB）和多溴联苯醚（PBDEs）等。

（3） 环境样品的采集要求

废旧电子电器产品拆解回收行业的重点关注污染物按性质和分析方法差异可分为有色金属（铝、铅、锌、铜、镍、钴、镁、钛、锡、锑、汞等）、黑色金属（铁、锰、铬等）、重金属（汞、镉、铅、铬、砷等）以及塑料、氟氯化碳、聚乙烯联苯、多氯联苯（PCB）、多溴联苯（PBB）和多溴联苯醚（PBDEs）等有毒有害物质，本标准提供了各类污染物的采集过程要求，以减少后续因环境样品采集导致的误差。其中固态样品的采集方法主要参考土壤环境监测技术规范（HJ 166-2004），汞及其测定的化合需存放在玻璃样品瓶中-20 oC储存，其他金属及砷的采集时应使用聚乙烯、玻璃进行采集并在4 oC下储存。液态样品的采集方法并无统一的样品采集与存放标准，依据污染物的不同特性应执行不同的采集及存放方法。对于汞及其化合物烷基汞应参考水质烷基汞的测定吹扫捕集/气相色谱-冷原子荧光光谱法（HJ 977-2018），其他金属及砷的采集容器材质与保存方法分别参考水样样品的保存及管理技术规定（HJ 493-2009）与水质65种元素的测定电感耦合等离子体质谱法（HJ 700-2014）。气态样品的采集与保存要求主要参考环境空气汞的测定巯基棉富集-冷原子荧光分光光度法 (暂行)（HJ 542-2009），空气和废气颗粒物中金属元素的测定电感耦合等离子体发射光谱法（HJ 777-2015）。

（4）检测分析与数据处理

对环境样品中的金属和类金属元素及其化合物、不同价态形式应开展定量分析。对有机污染物（氯代苯酚、多氯联苯、多氯萘、多环芳烃等）可同步开展定量分析、可疑目标筛查和非目标筛查分析。为使标准更具可操作性，标准中涉及有色金属污染物的环境样品定量检测方法按《场地土壤污染物人体暴露组解析技术 有色金属工业》（T/CSES 97）执行。对于可疑/非目标筛查方法，按照《场地土壤污染物人体暴露组解析技术 总纲》（T/CSES 94）附录C执行，筛查获得的组间差异特征峰经鉴定取得差异化合物信息。为便于场地特征污染物筛查和鉴定，建议研究者建立包含废旧电子电器产品拆解回收行业场地特征污染物分子结构信息的本地化筛查数据库，开展可疑目标筛查研究。

### 5.2.5 人群调查

（1）调查人群的选择

人群调查方案制定需根据废旧电子电器产品拆解回收行业场地土壤污染物清单中的特征污染物特点及其暴露途径，识别潜在内暴露污染物及其代谢产物。人群调查方案应包括调查人群选择、人数确定、人群抽取、问卷调查等内容。在开展人群调查前，应组织开展医学伦理审查并通过。

调查人群应充分考虑目标污染物的敏感人群及高暴露人群。调查人群应包括长期生活在场地周边暴露区范围内的周边暴露人群，以及长期生活在对照区的对照人群；对照人群应选择与暴露人群生活习性差别不大、且远离工业和交通污染地区的居民。此外，若调查时拆解回收区尚未停产或搬迁，调查人群还应包含在场地内从事废旧电子电器产品拆解回收行业的工作人员，即职业暴露人群。针对职业暴露人群，根据暴露情景差异，将暴露人群进一步细分为不同暴露等级，抽样人群应尽量涵盖不同人群分组。按照场地内不同暴露区域的划分，可根据主要工作区域将废旧电子电器产品拆解回收行业工人进一步细分为不同暴露情景工人：可将涉及主要污染物排放生产工艺的工人设高暴露人群；从事储运、装车等工种的工人设为中等暴露人群；文职人员设为低暴露人群。

（2）生物样品采集、问卷调查和体格检查

根据场地调查获得的污染物清单及其暴露途径，确定采集生物样品的类型，一般推荐采集血液和尿液样品。采集生物样品前需获得调查对象的知情同意并签订知情同意书。

废旧电子电器产品拆解回收行业污染场地暴露带来的人体内负荷污染物主要包括有色金属（铝、铅、锌、铜、镍、钴、镁、钛、锡、锑、汞等）、黑色金属（铁、锰、铬等）、重金属（汞、镉、铅、铬、砷等）以及塑料、氟氯化碳、聚乙烯联苯、多氯联苯（PCB）、多溴联苯（PBB）和多溴联苯醚（PBDEs），以及相应代谢产物。对于血液样品，应分别采集无抗凝血和抗凝血；无抗凝血样（约4 mL）用于针对有机污染物开展靶标和拟靶标分析，抗凝血样（约2 mL）用于针对人体内源性代谢物的非靶标分析。血液样品采集后可于冰盒中低温短途运输，运回实验室后需于-80 oC冷冻保存。尿液样品采用一次性尿杯采集（采样量约40 mL），主要用于分析VOCs和SVOCs及其相应的代谢产物。尿液样品采集后可于冰盒中冷藏运回实验室，随后使用冻存管分装并保存于-80 oC。血液和尿液样品采集具体操作可参考GB/T 16126。

采集生物样品的同时，对调查人群开展问卷调查，问卷应包括基本情况、行为生活方式、职业相关情况、环境相关情况、患病史情况、最近三个月身体状况等内容。根据场地土壤污染物可能引起的健康效应，选择相关指标对调查人群开展体格检查，内容包括症状和体征检查、影像学检查、生化指标及特征效应指标检测等。体格检查实验室及操作要求应符合《健康体检管理暂行规定》及《医疗机构临床实验室管理办法》相关规定。

（3）污染物定量分析

可采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）对生物样本中的金属/类金属污染物开展定量分析；采用气相色谱-质谱联用仪（GC-MS）对SVOCs进行定量分析；而针对代谢产物，因其普遍具有较强的亲水性，因此推荐采用HPLC-MS/MS进行定量分析。关于人体样品中污染物检测分析参照编制组前期发布的《场地土壤污染物人体暴露组解析技术 总纲》（T/CSES 94）附录E和F分别对血液和尿液中金属/类金属的前处理方法、仪器分析条件、数据处理、质量控制措施等进行了规范。另外，《尿中多种金属同时测定电感耦合等离子体质谱法》（GBZ/T 308-2018）规定了同时测定尿中钒、铬、钴、镉、铊、铅的电感耦合等离子体质谱法，也可为生物样品中金属的定量分析提供参考。

（4）污染物可疑/非目标筛查分析

可疑目标筛查分析主要是指针对已知分析物的化合物信息（如分子式、化学结构和理化性质），但尚未有参考标准品，通过高分辨质谱获得化合物前体离子同位素组成以及质谱碎片信息确定化合物分子式和结构信息，结合谱库比对，实现对潜在的目标化合物筛查鉴定及半定量分析的方法。

开展拟靶标分析前，应结合场地调查获得的污染物清单和文献调研，对废旧电子电器产品拆解回收行业污染场地人群生物样品中可能的特征污染物及其代谢产物进行推导；应用目前已相对比较成熟的化合物信息筛查数据库，如METLIN和T3DB等，建立包含废旧电子电器产品拆解回收行业场地特征污染物及其代谢产物分子结构信息和CAS号的筛查数据库。根据废旧电子电器产品拆解回收行业场地特征污染物及其迁移转化规律，结合文献调研，本标准在附录C提供了废旧电子电器产品拆解回收行业场地本地化筛查数据库应包含的特征污染物，包括卤代烃类、烃类、卤代多环芳烃、硝基类多环芳烃、羟基类多环芳烃、含氧类多环芳烃、多溴联苯醚、多氯联苯等235种SVOCs，为研究者构建本地化筛查数据库提供便利。

有机污染物及其代谢产物拟靶标分析的常用仪器为，超高效液相色谱-飞行时间质谱联用仪（UPLC-QTOF-MS）和气相色谱-飞行时间质谱联用仪（GC-QTOF-MS）等高分辨质谱仪器。GC-QTOF-MS主要针对VOCs和SVOCs等母体化合物分析，UPLC-QTOF-MS主要用于代谢产物的拟靶标分析。高分辨质谱全扫描的结果往往混杂大量源内反应形成的加合物、碎片或物质本身的同位素峰，对这些峰的正确识别以及对复杂数据的统计分析也是研究暴露组学的关键点之一。目前在暴露组学分子结构鉴定方面已有较多的应用软件作为辅助，如MS-FINDER和XCMS，结合HMDB和METLIN等数据库能够对这些化合物或代谢组学小分子进行比对鉴定。同时，通过添加已知浓度和质谱信息的同位素标记的标准品（即，定量内标），可实现对废旧电子电器产品拆解回收行业污染场地潜在人体内负荷污染物及其代谢产物的半定量分析。

本技术规范在靶标分析的基础上，通过优化仪器参数和生物样品前处理流程，建立了针对血液和尿液中特征污染物及其代谢产物拟靶标分析的前处理方法、仪器分析条件、数据处理、质量控制等详细流程。

（5）内源性代谢物分析

内源性代谢物主要是指机体物质和能量代谢过程中所形成的代谢产物或中间产物。废旧电子电器产品拆解回收行业场地土壤污染物持续高暴露，可能导致人群的内源性代谢物组成发生变化，可用于反映人体污染物暴露致病的早期指示物。结合已报道的清单中污染物及其代谢物健康效应类型及毒性参数，确定内源性代谢物分析采用的生物样品类型及检测手段。推荐使用血液和尿液，检测手段可采用靶标分析与非靶标分析，目标物类型可包括代谢组学和脂质组学等。参照编制组已公布团标《场地土壤污染物人体暴露组解析技术 总纲》（T/CSES 94）附录G对血液中内源性代谢物非目标筛查分析的前处理方法、仪器分析条件、数据处理、质量控制措施等进行了规范，为研究提供参考和工具。

## 5.2.6 暴露生物标志物筛选

暴露生物标志物筛选通过建立场地土壤污染物导致的人群特征内负荷污染物和特征内源性代谢物特征等健康效应指标之间的关联，结合研究与应用需要及专家讨论，筛选获得能反映场地人群暴露特征的污染物及/或其代谢产物作为暴露生物标志物。

（1）回归分析。本标准采用回归分析来明确体内负荷与健康效应之间的关联。回归分析中，应根据健康效应指标为计量变量或计数变量，来考虑各统计模型的适用性。以特征效应指标、特征内源性代谢物等健康效应指标为因变量，特征污染物为自变量，考虑年龄、性别、文化水平、BMI、饮食、体力活动等基本信息，采用主成分分析、贝叶斯线性回归、弹性网络回归等模型分析多种场地特征污染物混合暴露与健康效应指标之间的关联。

（2）综合判断。从暴露生物标志物应具有代表性、敏感性、关联性和可行性的要求出发，考虑到在统计分析和资料收集的基础上，采用组织权威专家讨论综合判断的方式获得废旧电子电器产品拆解回收行业场地的暴露生物标志物，可提高标志物在环境暴露风险管理和土壤污染评价中的价值和意义，增加标志物应用的潜力和可能性。暴露生物标志物一般不多于10个，是考虑其代表性和可行性设置。筛选时应充分考虑标志物与该场地环境特征的关联，如与特征土壤污染物、废旧电子电器产品拆解回收行业、生产工艺、原辅料、排放污染物等的关联。

## 5.2.7 解析报告编制

废旧电子电器产品拆解回收行业污染场地土壤污染物人体暴露组解析报告应全面、真实的反映解析工作的全过程，调查方案、原始数据、计算和分析过程可编入报告附录。报告应包括背景介绍、初步调查、场地调查、人群调查、暴露生物标志物筛选、质量控制与评价、结论及建议等章节。其中结论及建议部分应包括以下内容：（1）该废旧电子电器产品拆解回收行业污染场地基本情况及特点；（2）暴露生物标志物基本信息，包括理化性质、人体代谢转化情况等；（3）暴露生物标志物与该废旧电子电器产品拆解回收行业污染场地土壤污染物的关联，在不同暴露情景下的主要暴露途径分析，以及对应土壤污染物相关信息，包括理化性质、环境中的浓度和空间分布、工业来源等；（4）暴露生物标志物对应的生物样品类型和适用人群，生物样品的推荐采集方法、检测分析方法、质量评价与质量控制方案；（5）暴露生物标志物的当前研究情况，包括人体负荷水平、流行病学和毒理学研究等。

## 6 标准实施建议

本标准为指导性技术文件，首次制订。随着人体暴露组解析技术的不断完善和快速发展，以及废旧电子电器产品拆解回收行业清洁生产工业和污染防治技术的发展，本标准中的调查程序、污染物分析技术和暴露生物标志物筛选方法，以及行业重点关注工艺和污染物类型也可能会随之发生变化。因此，在本标准实施过程中，继续广泛听取和收集各方面的意见与建议，并根据实际应用情况，对本标准进行不断地修订与完善，使其实用性和可操作性与时俱进，为规范开展场地土壤污染物人体暴露组解析工作提供依据和指导。