

电子废弃物回收在中国和印度：工作场所和环境污染（摘要）

简介

当前，全球市场对电子电气产品的需求持续增长，但是产品的生命周期却愈发缩短，从而相应地产生了电子废物的大泛滥。正如联合国环境规划署（2005年）¹所提到的一样：

“每年全球范围约产生 2000 至 5000 万吨废弃电子电气设备（简称为“电子废物”），这些电子废物将对人体健康和环境带来严重的威胁。仅在中国，每年就产生 400 万台报废的个人电脑。”

由于电子电气产品的零件广泛使用了很多有害化学物质，因此这种迅速增长的“电子废物”流给人类带来了额外的困难，并给日后废弃产品的搬运、回收和处置方面带来了重大的问题。

欧盟、日本、韩国、台湾地区和美国几个州都先后通过立法，让生产者对其报废产品承担相应的责任。从 2006 年 7 月开始，欧盟将禁止在电子电气产品中使用某些有害物质，从而实现较为安全的产品回收工作。

然而，当前在亚洲大部分地区，“电子废物”回收领域的大部分方面尚未得到有效管理，而对于“电子废物”给环境、回收工人的人体健康及周边社区所带来的影响，也缺乏充分的研究。

本研究报告的设计

本研究报告旨在简单介绍中国和印度电子废物回收领域里一些工作坊和废物堆放场的工作场所和环境污染问题。从 2005 年 3 月起，我们在中国南部广东省贵屿镇及其周边地区及印度新德里郊区的有关场所中，共收集了 70 余份样本。这些样本包括从一些典型场所采集而来的电子工业废料、室内尘埃、土壤、河流沉积物及地下水，而这些典型场所代表了这两个国家在电子电气垃圾的拆解、回收和最终处置过程（如存储、零件拆卸、塑料粉碎、酸处理/酸浸、露天焚烧以及残余物质倾倒）中普遍采用的所有重要阶段。

¹联合国环境规划署（2005年）《电子垃圾：IT 设备制造及使用的阴暗面》，联合国环境规划署关于新兴环境威胁的第 5 号预警。

主要研究结果概述

研究结果确认，在处理电子电气垃圾的所有阶段，都存在将大量有毒重金属和有毒的有机化合物释放到工厂环境以及周边土壤和水道（至少在此次研究中存在此种情况）的风险。在电子工业废物、室内尘埃及河流沉积物中普遍存在的有毒重金属，均为人们所熟知的广泛用于电子领域的物质，即：

- l 铅和锡，大部分最为可能源自焊料，而铅则大部分源自电池；
- l 铜，例如源自电线和电缆；
- l 镉，源自多处，如电池和焊接点；
- l 铈，多数可能源自将三氧化铈用作塑料及树脂的阻燃添加剂，也源自在电气焊料中的使用。

在许多样本中，还发现了其它多种与电子行业相关的金属，包括钡、铬、钴、金、汞、镍、银和锌。

在垃圾和沉积物样本中所发现的有机污染物的范围，同样也反映了在当前或历史电子电气产品中，使用了某些有害化学物质，包括溴系、氯系和磷基阻燃剂、邻苯二甲酸酯、长链有机酸酯。其中，多溴联苯（PBDE）和聚氯联二苯（PCB）的存在特别明显。此外还有众多其它种类的有机化学品，一些有机化学品所含有的氯和溴比较不容易鉴定出来。假设采用粗略法来调查回收领域的多数环节，我们很有可能会发现，由于产品的不完全燃烧或由于混和型废弃物的化学反应，导致了某些化学物质的产生。

根据中国和印度在“电子废物”回收领域采用的不同活动和程序所得出的主要研究结果，我们将在下文进行综合论述，此外，下文中我们还将简单介绍一些化学族所带来的危害。

零件拆卸和焊料回收

从贵屿镇的北林区（中国）三个焊料回收厂地板上采集的尘埃样本里，含有众多金属物质，其含量相对于背景含量而言要高了许多，特别是铅和锡、铜、铈以及在某些情况下出现的镉和汞。在一份尘埃样本中，锡占其重量的 29.3%，铅占 7.6%，铜占 1.1%。在从中国工厂采集的所有尘埃中，其铅浓度高于世界其它地方尘埃所记录的标准铅浓度达数百倍。铅（Pb）作为焊料（铅和锡的合金）的主要成分，广泛应用于电子产品中，如阴极射线管（电视机和显示器）玻璃以及铅酸电池中的氧化铅。其化合物同样还在聚氯乙烯（PVC）线缆和其它产品中用作稳定剂。铅对于人体、动物和植物均具有极大的毒性。铅可以通过长期多次接触进入人体，并对神经系统特别是青少年正处于发育的神经系统产生无法消除的影响。

在印度零件拆卸工厂中所采集的样本，也明显存在类似的现象。普通拆卸工厂的尘埃含有相同的金属成分，含量略低于中国样本所记录的含量，但同样远远高于背景含量（约为

5-20 倍)。尤其是从马来普里和布拉迪区电池拆解厂所采集来的尘埃，遭受到特别严重的污染，前者含有 8.8%的铅而后者含有 20%的镉。后面这个数据约为室内尘埃样本标准含量的 4 万倍。

镉 (Cd) 在电子产品中，通常以镉合金形式出现在开关和焊接点里，也用作可充电电池的镉化合物、旧式聚氯乙烯 (PVC) 线缆里紫外光稳定剂以及旧式阴极射线管里的“磷”层。与铅一样，镉也可以在人体内长期囤积，长期接触镉会损坏肾和骨骼构造。镉及其化合物为众所周知的致癌物，主要通过吸入受污染的气体或尘埃进入人体。

对印度工厂采集的尘埃样本进行污染物分析，我们发现所有的样本均受到有机污染物聚氯联二苯 (PCB) (每个样本中均含有超过 35 种的同族污染物) 以及曾广泛用于电子电气应用的化学物品的污染，尽管现在全世界都已经禁止其用于新生产的产品中。在三个样本中，有一种取自 Shashtri Park 一家工厂的样本也含有两种同族溴系阻燃剂多溴联苯 (PBDE)，当前世界上大部分地区仍然使用这种物质。在所有这三个样本中，很大一部分 (52-69%) 从尘埃中分离出来的化学物质无法进行鉴定。前些年我们从 Shashtri PARK 一家工厂采集的样本尘埃中也含有聚氯联二苯和其它混合型有机污染物。

二十世纪七十年代末期前，**聚氯联二苯 (PCB)** 一直都被广泛用作变压器和电容器的绝缘液体，也被用作聚氯乙烯和其它聚合物中的阻燃增塑剂。这是一种高度持久的具有生物累积性的化学物质，能够在环境中迅速传播，并在野生动植物的体内组织中成千上万倍蔓延。聚氯联二苯能够产生多种有毒效应，包括抑制免疫系统、肝脏损伤、癌促进、神经系统损伤、行为转变以及损伤男性和女性的生殖系统。

在贵屿镇的北林区 (中国)，我们对三个尘埃样本进行初步研究。这三种尘埃样本，两个来自两名焊料回收厂工人的家中，一个来自与该行业毫无瓜葛的一户人家。研究结果显示，家庭环境可能会受到从工厂带来的化学物质的污染 (如由于工作服受到污染所引起的)。尽管其家庭本身远离焊料回收厂，但在这两名焊料工人家中的尘埃里，**其铜、铅、锡、铈的含量及较少的镉含量，远远高于那家对照试样人家尘埃中的含量。**这个结果表明，很有必要对该行业工人的家庭接触污染物的情况进行进一步的研究调查。

通过对新德里 Shashtri Park 回收区周边几个地点街道尘埃的分析，也能反应出工厂外环境的污染情况。与其它两个地区相比，这个区域周边更多为住宅区。尽管重金属的分析结果还未能完全确定，但在四种从 Shashtri Park 区采集来的尘埃中，有三个被发现含有聚氯联二苯和化学物质的痕迹，而从 Kailashnagar 或 Safourjung 区采集的街道尘埃中，却没有发现聚氯联二苯或化学物质的痕迹。

机械粉碎

在中国的贵屿镇，由于机械粉碎而积累在排水道中的沉积物，均含有重金属和混合型有机污染物，尽管数量不等，但一般来说含量都非常高。从贵屿-南阳公路旁一家工厂及陈店-贵屿公路旁两家工厂排水道所采集的沉积物中，均含有高含量的铜（每千克约含有 9500 至 45900 毫克）、铅（每千克约含有 4500-44300 毫克）和锡（每千克约含有 4600-33000 毫克）以及锑（每千克约含有 1390-2150 毫克）、镍（每千克约含有 150-2060 毫克）和镉（每千克约含有 13-85 毫克）。就铜、铅、锡、镍和镉而言，其含量约为未受污染河流沉积物的 400 至 600 倍，而就锑而言，其含量则为背景含量的 200 倍左右。从陈店-贵屿公路旁一家工厂所采集而来的废水，含有一层由水中悬浮颗粒形成的浓泥浆。该废水同样被发现含有高浓度的这些重金属及其它重金属。

这些废水中的常见有机污染物包括溴系阻燃剂化合物——多溴联苯。贵屿-南阳公路旁工厂废水沟里的沉积物中，总共分离出 43 种多溴联苯同族污染物，从三溴化合物至六溴化合物。

而从陈店-贵屿公路旁一家工厂废水沟里采集的两个沉积物样品中，也发现含有同样数量的多溴联苯。在采样过程中，从该工厂流向废水沟里的废水/泥浆流中，也可以发现含有多溴联苯的痕迹。

多溴联苯 (PBDE) 是广泛用于多种材料的几种阻燃剂中的一种，用来防止火焰的蔓延，包括用于许多电子产品的外壳和零件中。它们属于比较持久的影响环境的化学物质，其中一些具有较高的生物累积性，能够干扰动物的脑部正常发育。几种多溴联苯被疑似为内分泌干扰物质，能够干扰参与生长和性发育的激素。此外，有报道称多溴联苯也会对免疫系统产生影响。

从该废水沟里采集的两种沉积物均含有能够干扰激素的**化学壬基酚**（在其中一种沉积物中，这种壬基酚以同质混合物的形式出现）。此外，这些样本中（即从工厂附近采集而来的样本），有一个样本含有多种邻苯二甲酸酯物质，这是在多种聚合物中（特别是聚氯乙烯）用作增塑剂的化学物质，包括众所周知的繁殖性毒素邻苯二甲酸二丁酯（DBP）以及邻苯二甲酸双酯（DEHP）。该样本还含有有害的有机磷阻燃剂磷酸三苯脂（TPP）的残余物质以及两种紧密相关的化学物质。这两种化学物质可能为配制磷酸三苯脂（TPP）时的污染物或主要降解产物。

我们无法从陈店-贵屿公路旁另一家粉碎厂的废水沟里采集到废水。但是，从该废水沟沉积物的样本中，我们仍然发现了多种氯化苯、氯化/溴化苯混合物和氯化萘。出现氯化萘可能是因为之前用作塑料和橡胶的阻燃添加剂，尽管他们还有其它多种用途。

大多数人都知道，**壬基苯酚 (NP)** 是壬基苯酚乙氧化物洗涤剂的分解产物，但根据其它报道，该化学物质还用作某些塑料的抗氧化剂。它是一种强有力的内分泌干扰物质，能够导致**鱼类的中间性 (即具有雌雄特性的单体)**。壬基苯酚也可以在食物链中逐步形成，能够对**损坏 DNA 甚至是人体内的精虫功能**。

尽管我们没有在印度抽样检验类似的工厂，但从 Zarfarabad 一家工厂采集的塑料废品碎片样本中，也同样发现了多溴联苯和有机磷阻燃剂磷酸三苯脂，同时还发现了壬基苯酚的痕迹。虽然此样本中大部分金属的浓度相对较低，但其锑含量却非常高 (达到每千克含 124 毫克)，这可以反映在该被粉碎的塑料零件中含有三氧化锑 (我们认为主要是键盘和显示器外壳的塑料零件)。

锑 (Sb) 是一种可以用于多种工业用途的金属，包括用作阻燃剂 (如三氧化锑) 和金属焊料的痕量组分。在一些表现形式上，锑显示了很多与砷的化学相似性，包括其毒性。在工厂内接触高含量的锑，如尘埃或气体，可能导致严重的皮肤问题和其它健康问题。三氧化锑被认为是一种潜在的人体致癌物质。

酸处理/酸浸

正如我们所预料的，从龙门乡 (中国) 两家从事电子垃圾酸处理/酸浸的工厂内的露天采石场所采集而来的一些酸性固体废物样本，也含有高含量的几种重金属。这些重金属包括**铅 (每千克含 350-5400 毫克)**、**锡 (每千克含 640-3600 毫克)**、**铜 (每千克含 230-6600 毫克)**、**锑 (每千克含 360-1590 毫克)** 和**镍 (每千克含 27-940 毫克)**。这些铜、铅和锡的含量，是那些未受污染土壤和沉积物所含背景值的 100 多倍。在四个固体废物样本中，三个被发现含有一些氯化苯的痕迹，而其中两个样本含有大量的和氯联二苯 (PCB) 和多溴联苯 (PBDE)。

在四个酸性固体废物样本中 (从一家工厂内的露天采石场采集而来)，有一个样本还被发现含有明显的邻苯二甲酸酯以及一种未知起因的溴化硝基酚。从同一露天采石场采集的高酸性废水中，含有五种不同的邻苯二甲酸酯、一种磷酸三苯脂的氧化衍生物以及一种同样未知起因的溴化硝基酚。同样如我们所预料的，该废水中的金属浓度同样很高，包括**锑 (每千克含 31.8 毫克)**、**镉 (每千克含 12.2 毫克)**、**铜 (每千克含 774 毫克)**、**镍 (每千克含 153 毫克)** 及**锡 (每千克含 85.5 毫克)**。

磷酸三苯脂 (TPP) 是一种用于电子设备的有机磷阻燃剂，如用于计算机显示器外壳。磷酸三苯脂对水生生物具有急毒性，也是人体血液一个主要酶系统中的强抑制剂。此外，就我们所知，它还能导致某些人的接触性皮炎，同时也是一种可能的内分泌干扰物质。

通过对酸性工厂上游和下游所采集的类似沉积物样本进行对比，可以清楚发现污染现象

的本质和范围源自这些工厂的生产活动。与上游沉积物样本相比，下游沉积物样本镉、汞和镍的含量高了 20 余倍，镉和铜的含量高了近 10 倍，而铅、锡和锌的含量高了 3 至 6 倍。此外，上游样本 (pH 值为 6) 仅含有 15 种可萃取的有机化合物，主要为非卤代碳氢化合物，而下游样本 (pH 值为 4，即酸性更高) 含有 70 多种化合物，包括邻苯二甲酸双酯和 24 种独立的多溴联苯同族物质。水和沉积物的酸化以及有毒金属更大范围的移动性，都极有可能产生有毒作用，本身预计就会对水生生物产生重大影响。

在贵屿-南阳公路旁另外两家酸处理作坊附近的河流沉积物中，也发现了邻苯二甲酸酯和多溴联苯及其它有机污染物。正如我们所预料的，从其中一家较大工厂附近的“溢流”区所采集的酸性固体废物，含有高含量的铜、铅、锡和镉，而其镍和银的含量也相对升高。这些废物还含有多溴联苯、聚氯联二苯和氯化苯，以及一种氯化萘衍生物和一种丙氧化萘衍生物。在其中一种样本中，还发现了邻苯二甲酸双酯。附近河流沉积物具有高酸性，除了邻苯二甲酸酯外，还含有相同种类的金属污染物。从同一条河流稍远离工厂的地方采集对照试样，发现该对照试样几乎不含有有机污染物。而该对照试样中，很多金属的含量也低了几百倍。

多氯化萘 (PCN) 是聚氯联二苯的化学前体，曾广泛用于电容器及用作电线的绝缘化合物 (此外还有其它用途)。这种化学物质很多属性与聚氯联二苯一样，包括在环境中的持久性、对野生动植物及人类 (可能) 的毒性。有关报道显示，多氯化萘能够影响动物的皮肤、肝脏、神经系统及生殖系统。

在新德里 Mandoli 工业区一家小车间内，我们从一台酸处理/酸浸设备上采集样本，主要用来研究酸浸过程中不同阶段的材料和废物。正如我们所预料的，地面塑料废物原样中能够检测到的重金属，在最终用过的酸性废物中含量非常高 (如，每千克中含有 68 毫克的镉、240 毫克的铜、20 毫克的铅、478 毫克的镍、340 毫克的锡和 2710 毫克的锌)。此外，这些酸性废料还发现了邻苯二甲酸酯和氯酚的残余物质。

此外，从酸处理设备采集的几个样本均含有大量的目前尚未能鉴定的化合物，这些化合物显示了多卤化 (也可能为多溴化) 有机化合物的裂解方式特点。还需要开展进一步的研究以便鉴定这些化合物。

在这些车间搬运浓缩的酸性溶液将对人体健康和安全带来明显的危害，此外，工人们还表示对于这种用过的浓缩酸性废水，只是简单地进行填土处理，这样也会带来严重的环境危害。

露天焚烧

我们从贵屿镇龙港村的一个垃圾场采集了几种 (五种) 灰烬和半焚烧电子垃圾的样本，通过研究分析，发现这些垃圾污染的范围和程度均存在差异性。这些垃圾中每一种特定污染

物的含量，几乎都取决于焚烧部件的精确性质以及所采用的焚烧技术。大部分样本都含有过量的镉、铜、铅和锌。而锑含量尤其高，在五个样本中，有四种含量在每千克 1000 毫克或以上，而剩下那个样本的锑含量则达到每千克 15200 毫克。

最后这个样本中，有害有机污染物的数量和种类也最多，包括多种氯化苯、氯化/溴化苯混合物、2-溴酚、四溴联苯（为一种多溴联苯）、3,4-二溴苯乙烯、1,3-二溴丁烷和三种三溴甲苯的异构体。一些特殊用途如某些塑料的阻燃添加剂，可能产生某些或全部此类污染物，但我们也不能排除由于未完全焚化电子产品从而产生一些此类污染物的可能性。此外，在该样本中还检测出其它一些有机化合物，包括大量的多环芳烃（PAH，未完全焚化的典型产物）和聚氯联二苯（PCB）以及其它 10 余种化合物，这 10 余种化合物疑似为卤化化合物，但我们无法进行可靠的鉴定。毒性最强的二恶英同族体即 2,3,7,8-四氯二苯并二恶英（TCDD），随后由一家合格进行二恶英化学分析的外部实验室进行分析，并确认其含量。当时我们不可能分析其它样本是否含有氯化二恶英或分析任何样本是否含有溴化二恶英（尽管预计可能含有这些物质）。

从新德里（印度）两个废物焚烧场（一个位于 Ibrahimpur，一个位于 Shashtri 公园）中采集的灰烬，其特点也是含有高含量的镉、铅和锌。此外，也发现含有明显的聚氯联二苯、氯化苯和多环芳烃。

汞（Hg）仍然使用于一些电池和纯平电子显示装置的照明部件中。以前，汞还用于开关和继电器。汞及其化合物具有极高的毒性，能够损坏中央神经系统和肾。一旦进入环境中，汞能够通过细菌活动转化成有机的甲基形式，这种甲基形式不但具有毒性，还具有极高的生物积累性。

待处理垃圾的储存

我们从新德里两个存放阴极射线管（CRT）的地方（Kantinagar 和 Brijgang）采集了土壤和尘埃样本。这两个地方存放了从电视机到计算机显示器的阴极射线管。研究表明，这些土壤和尘埃可能受到来自阴极射线管中重金属的污染。在阴极射线管内，镉、锌和硫化钷被用作“磷”层，而氧化铅可以在玻璃上自行产生。阴极射线管存放区的尘埃和土壤，所有这些金属的含量都被大大提高。

结论

虽然本文显然不是一份囊括每一国家“电子废物”回收设施的详尽研究报告，但以上所述的研究结果还是能够说明该工业行业所带来的健康和环境问题的宽度和规模。在垃圾处理过程中，对于垃圾和有害化学物质的搬运，人们通常几乎没有关注工人或周围社区的健康和安全，更没有考虑到环境。总的来说，我们所得到的研究调查结果是，**众多有毒重金属和持**

久的有机污染物，对工作场所和邻近环境造成了严重的污染。

很明显的一点是，我们不可能通过本研究调查结果来评估这些普遍的工作模式可能给人体健康带来的危害，也不可能对每个工厂所产生的环境影响的方方面面，进行一次全面的调查，或者是在每个国家内对整个行业进行一次全面地调查。但是，本研究调查结果却表明，在一些地区，接触废物流所产生的有害化学物质的现象非常严重。为了鉴定并量化该工业领域所带来的全面影响，还需要进行更进一步的研究，包括研究工人以及邻近社区居民的身体健康。

同时，我们所获得的数据也迫切要求，以上两个国家必须马上采取措施，解决工作场所的健康、安全和垃圾管理问题。

本文所调查的问题，常常由于本调查中所采样地区工作模式不善或缺乏负责的垃圾管理而大大加剧问题的严重性。但是，回收过程各个阶段所产生的垃圾受到多种有毒重金属和持久有机污染物的污染，直接原因是在生产制造阶段采用了这些有害材料，这却是一个不争的事实。因此，除了提及应减少不断增长的大量电子垃圾流所带来的多种不可见影响外，本文还提出应加大对此类垃圾跨国界流动及回收方式的控制力度，同时还着重指出应对所有新电子产品，进行重新设计和重新配方，以便：

- I 益于进行正确的拆解和零部件拆卸，以及
- I 从源头上避免使用有害化学零部件。

欧盟《废弃电子电气设备指令》及相关的《有害物质限制条例》在解决这些问题上起到某种作用，但这两部指令仅适用于欧盟区域，且仅涵盖电子产品生产所使用的有害物质中的一小部分。

简而言之，本研究报告进一步阐明了电子产品生产制造商应从产品生产开始至产品寿命终结这一过程中对其产品负责的紧迫性。生产制造商必须开发并设计具有更长寿命的、安全的、便于维修、升级和回收的清洁产品，且不能让工人和环境暴露在有害化学物质下，这就是生产制造商对这些问题所能做出的主要贡献。