

電子廢棄物回收在中國和印度：工作場所和環境污染（摘要）

簡介

當前，全球市場對電子電氣產品的需求持續增長，但是產品的生命週期卻愈發縮短，從而相應地產生了電子廢物的大氾濫。正如聯合國環境規劃署（2005年）¹所提到的一樣：

“每年全球範圍約產生 2000 至 5000 萬噸廢棄電子電氣設備（簡稱為“電子廢物”），這些電子廢物將對人體健康和環境帶來嚴重的威脅。僅在中國，每年就產生 400 萬台報廢的個人電腦。”

由於電子電氣產品的零件廣泛使用了很多有害化學物質，因此這種迅速增長的“電子廢物”流給人類帶來了額外的困難，並給日後廢棄產品的搬運、回收和處置方面帶來了重大的問題。

歐盟、日本、韓國、台灣地區和美國幾個州都先後通過立法，讓生產者對其報廢產品承擔相應的責任。從 2006 年 7 月開始，歐盟將禁止在電子電氣產品中使用某些有害物質，從而實現較為安全的產品回收工作。

然而，當前在亞洲大部分地區，“電子廢物”回收領域的大部分方面尚未得到有效管理，而對於“電子廢物”給環境、回收工人的人體健康及周邊社區所帶來的影響，也缺乏充分的研究。

本研究報告的設計

本研究報告旨在簡單介紹中國和印度電子廢物回收領域裏一些工作作坊和廢物堆放場地的場所和環境污染問題。從 2005 年 3 月起，我們在中國南部廣東省貴嶼鎮及其周邊地區及印度新德里郊區的有關場所中，共收集了 70 餘份樣本。這些樣本包括從一些典型場所採集而來的電子工業廢料、室內塵埃、土壤、河流沉積物及地下水，而這些典型場所代表了這兩個國家在電子電氣垃圾的拆解、回收和最終處置過程（如存儲、零件拆卸、塑料粉碎、酸處理/酸浸、露天焚燒以及殘餘物質傾倒）中普遍採用的所有重要階段。

¹聯合國環境規劃署（2005年）《電子垃圾：IT 設備製造及使用的陰暗面》，聯合國環境規劃署關於新興環境威脅的第 5 號預警。

主要研究結果概述

研究結果確認，在處理電子電氣垃圾的所有階段，都存在將大量有毒重金屬和有毒的有機化合物釋放到工廠環境以及周邊土壤和水道（至少在此次研究中存在此種情況）的風險。在電子工業廢物、室內塵埃及河流沉積物中普遍存在的有毒重金屬，均為人們所熟知的廣泛用於電子領域的物質，即：

- Ⅰ 鉛和錫，大部分最為可能源自焊料，而鉛則大部分源自電池；
- Ⅰ 銅，例如源自電線和電纜；
- Ⅰ 鎘，源自多處，如電池和焊接點；
- Ⅰ 銻，多數可能源自將三氧化銻用作塑料及樹脂的阻燃添加劑，也源自在電氣焊料中的使用。

在許多樣本中，還發現了其它多種與電子行業相關的金屬，包括鋇、鉻、鈷、金、汞、鎳、銀和鋅。

在垃圾和沉積物樣本中所發現的有機污染物的範圍，同樣也反映了在當前或歷史電子電氣產品中，使用了某些有害化學物質，包括溴系、氯系和磷基阻燃劑、鄰苯二甲酸酯、長鏈有機酸酯。其中，多溴聯苯（PBDE）和聚氯聯二苯（PCB）的存在特別明顯。此外還有眾多其它種類的有機化學品，一些有機化學品所含有的氯和溴比較不容易鑒定出來。假設採用粗略法來調查回收領域的多數環節，我們很有可能會發現，由於產品的不完全燃燒或由於混和型廢棄物的化學反應，導致了某些化學物質的產生。

根據中國和印度在“電子廢物”回收領域採用的不同活動和程序所得出的主要研究結果，我們將在下文進行綜合論述，此外，下文中我們還將簡單介紹一些化學族所帶來的危害。

零件拆卸和焊料回收

從貴嶼鎮的北林區（中國）三個焊料回收廠地板上採集的塵埃樣本裏，含有眾多金屬物質，其含量相對於背景含量而言要高出了許多，特別是鉛和錫、銅、銻以及在某些情況下出現的鎘和汞。在一份塵埃樣本中，錫占其重量的 29.3%，鉛占 7.6%，銅占 1.1%。在從中國工廠採集的所有塵埃中，其鉛濃度高於世界其它地方塵埃所記錄的標準鉛濃度達數百倍。鉛（Pb）作為焊料（鉛和錫的合金）的主要成分，廣泛應用於電子產品中，如陰極射線管（電視機和顯示器）玻璃以及鉛酸電池中的氧化鉛。其化合物同樣還在聚氯乙烯（PVC）線纜和其它產品中用作穩定劑。鉛對於人體、動物和植物均具有極大的毒性。鉛可以通過長期多次接觸進入人體，並對神經系統特別是青少年正處於發育的神經系統產生無法消除的影響。

在印度零件拆卸工廠中所採集的樣本，也明顯存在類似的現象。普通拆卸工廠的塵埃含有相同的金屬成分，含量略低於中國樣本所記錄的含量，但同樣遠遠高於背景含量（約為

5-20 倍)。尤其是從馬來普裏和布拉迪區電池拆解廠所採集來的塵埃，遭受到特別嚴重的污染，前者含有 8.8%的鉛而後者含有 20%的鎘。後面這個數據約為室內塵埃樣本標準含量的 4 萬倍。

鎘 (Cd) 在電子產品中，通常以鎘合金形式出現在開關和焊接點裏，也用作可充電電池的鎘化合物、舊式聚氯乙烯 (PVC) 線纜裏紫外光穩定劑以及舊式陰極射線管裏的“磷”層。與鉛一樣，鎘也可以在人體內長期囤積，長期接觸鎘會損壞腎和骨骼構造。鎘及其化合物為眾所周知的致癌物，主要通過吸入受污染的氣體或塵埃進入人體。

對印度工廠採集的塵埃樣本進行污染物分析，我們發現所有的樣本均受到有機污染物聚氯聯二苯 (PCB) (每個樣本中均含有超過 35 種的同族污染物) 以及曾廣泛用於電子電氣應用的化學物品的污染，儘管現在全世界都已經禁止其用於新生產的產品中。在三個樣本中，有一種取自 Shashtri Park 一家工廠的樣本也含有兩種同族溴系阻燃劑多溴聯苯 (PBDE)，當前世界上大部分地區仍然使用這種物質。在所有這三個樣本中，很大一部分 (52-69%) 從塵埃中分離出來的化學物質無法進行鑒定。前些年我們從 Shashtri PARK 一家工廠採集的樣本塵埃中也含有聚氯聯二苯和其它混合型有機污染物。

二十世紀七十年代末期前，**聚氯聯二苯 (PCB)** 一直都被廣泛用作變壓器和電容器的絕緣液體，也被用作聚氯乙烯和其它聚合體中的阻燃增塑劑。這是一種高度持久的具有生物累積性的化學物質，能夠在環境中迅速傳播，並在野生動植物的體內組織中成千上萬倍蔓延。聚氯聯二苯能夠產生多種有毒效應，包括抑制免疫系統、肝臟損傷、癌促進、神經系統損傷、行為轉變以及損傷男性和女性的生殖系統。

在貴嶼鎮的北林區 (中國)，我們對三個塵埃樣本進行初步研究。這三種塵埃樣本，兩個來自兩名焊料回收廠工人的家中，一個來自與該行業毫無瓜葛的一戶人家。研究結果顯示，家庭環境可能會受到從工廠帶來的化學物質的污染 (如由於工作服受到污染所引起的)。儘管其家庭本身遠離焊料回收廠，但在這兩名焊料工人家中的塵埃裏，其銅、鉛、錫、鎘的含量及較少的鎘含量，遠遠高於那家對照試樣人家塵埃中的含量。這個結果表明，很有必要對該行業工人的家庭接觸污染物的情況進行進一步的研究調查。

通過對新德里 Shashtri Park 回收區周邊幾個地點街道塵埃的分析，也能反應出工廠外環境的污染情況。與其它兩個地區相比，這個區域周邊更多為住宅區。儘管重金屬的分析結果還未能完全確定，但在四種從 Shashtri Park 區採集來的塵埃中，有三個被發現含有聚氯聯二苯和化學物質的痕跡，而從 Kailashnagar 或 Safourjung 區採集街道塵埃中，卻沒有發現聚氯聯二苯或化學物質的痕跡。

機械粉粹

在中國的貴嶼鎮，由於機械粉碎而積累在排水道中的沉積物，均含有重金屬和混合型有機污染物，儘管數量不等，但一般來說含量都非常高。從貴嶼-南陽公路旁一家工廠及陳店-貴嶼公路旁兩家工廠排水道所採集的沉積物中，均含有高含量的銅（每千克約含有 9500 至 45900 毫克）、鉛（每千克約含有 4500-44300 毫克）和錫（每千克約含有 4600-33000 毫克）以及銻（每千克約含有 1390-2150 毫克）、鎳（每千克約含有 150-2060 毫克）和鎘（每千克約含有 13-85 毫克）。就銅、鉛、錫、鎳和鎘而言，其含量約為未受污染河流沉積物的 400 至 600 倍，而就銻而言，其含量則為背景含量的 200 倍左右。從陳店-貴嶼公路旁一家工廠所採集而來的廢水，含有一層由水中懸浮顆粒形成的濃泥漿。該廢水同樣被發現含有高濃度的這些重金屬及其它重金屬。

這些廢水中的常見有機污染物包括溴系阻燃劑化合物——多溴聯苯。貴嶼-南陽公路旁工廠廢水溝裏的沉積物中，總共分離出 43 種多溴聯苯同族污染物，從三溴化合物至六溴化合物。

而從陳店-貴嶼公路旁一家工廠廢水溝裏採集的兩個沉積物樣品中，也發現含有同樣數量的多溴聯苯。在採樣過程中，從該工廠流向廢水溝裏的廢水/泥漿流中，也可以發現含有多溴聯苯的痕跡。

多溴聯苯（PBDE）是廣泛用於多種材料的幾種阻燃劑中的一種，用來防止火焰的蔓延，包括用於許多電子產品的外殼和零件中。它們屬於比較持久的影響環境的化學物質，其中一些具有較高的生物積累性，能夠干擾動物的腦部正常發育。幾種多溴聯苯被疑似為內分泌干擾物質，能夠干擾參與生長和性發育的激素。此外，有報道稱多溴聯苯也會對免疫系統產生影響。

從該廢水溝裏採集的兩種沉積物均含有能夠干擾激素的化學壬基酚（在其中一種沉積物中，這種壬基酚以同質混合物的形式出現）。此外，這些樣本中（即從工廠附近採集而來的樣本），有一個樣本含有多種鄰苯二甲酸酯物質，這是在多種聚合物中（特別是聚氯乙烯）用作增塑劑的化學物質，包括眾所皆知的繁殖性毒素鄰苯二甲酸二丁酯（DBP）以及鄰苯二甲酸雙酯（DEHP）。該樣本還含有有害的有機磷阻燃劑磷酸三苯脂（TPP）的殘餘物質以及兩種緊密相關的化學物質。這兩種化學物質可能為配製磷酸三苯脂（TPP）時的污染物或主要降解產物。

我們無法從陳店-貴嶼公路旁另一家粉碎廠的廢水溝裏採集到廢水。但是，從該廢水溝沉積物的樣本中，我們仍然發現了多種氯化苯、氯化/溴化苯混合物和氯化萘。出現氯化萘可能是因為之前用作塑料和橡膠的阻燃添加劑，儘管他們還有其它多種用途。

大多數人都知道，**壬基苯酚（NP）**是壬基苯酚乙氧化物洗滌劑的分解產物，但根據其它報道，該化學物質還用作某些塑料的抗氧化劑。它是一種強有力的內分泌干擾物質，能夠導致魚類的中間性（即具有雌雄特性的單體）。壬基苯酚也可以在食物鏈中逐步形成，能夠對損壞 DNA 甚至是人體內的精蟲功能。

儘管我們沒有在印度抽樣檢驗類似的工廠，但從 Zarfarabad 一家工廠採集的塑料廢品碎片樣本中，也同樣發現了多溴聯苯和有機磷阻燃劑磷酸三苯脂，同時還發現了壬基苯酚的痕跡。雖然此樣本中大部分金屬的濃度相對較低，但其銻含量卻非常高（達到每千克含 124 毫克），這可以反映在該被粉碎的塑料零件中含有三氧化銻（我們認為主要是鍵盤和顯示器外殼的塑料零件）。

銻（Sb）是一種可以用於多種工業用途的金屬，包括用作阻燃劑（如三氧化銻）和金屬焊料的痕量組分。在一些表現形式上，銻顯示了很多與砷的化學相似性，包括其毒性。在工廠內接觸高含量的銻，如塵埃或氣體，可能導致嚴重的皮膚問題和其它健康問題。三氧化銻被認為是一種潛在的人體致癌物質。

酸處理/酸浸

正如我們所預料的，從龍門鄉（中國）兩家從事電子垃圾酸處理/酸浸的工廠內的露天採石場所採集而來的一些酸性固體廢物樣本，也含有高含量的幾種重金屬。這些重金屬包括鉛（每千克含 350-5400 毫克）、錫（每千克含 640-3600 毫克）、銅（每千克含 230-6600 毫克）、銻（每千克含 360-1590 毫克）和鎳（每千克含 27-940 毫克）。這些銅、鉛和錫的含量，是那些未受污染土壤和沉積物所含背景值的 100 多倍。在四個固體廢物樣本中，三個被發現含有一些氯化苯的痕跡，而其中兩個樣本含有大量的和氯聯二苯（PCB）和多溴聯苯（PBDE）。

在四個酸性固體廢物樣本中（從一家工廠內的露天採石場採集而來），有一個樣本還被發現含有明顯的鄰苯二甲酸酯以及一種未知起因的溴化硝基酚。從同一露天採石場採集的高酸性廢水中，含有五種不同的鄰苯二甲酸酯、一種磷酸三苯脂的氧化衍生物以及一種同樣未知起因的溴化硝基酚。同樣如我們所預料的，該廢水中的金屬濃度同樣很高，包括銻（每千克含 31.8 毫克）、鎳（每千克含 12.2 毫克）、銅（每千克含 774 毫克）、鎳（每千克含 153 毫克）及錫（每千克含 85.5 毫克）。

磷酸三苯脂（TPP）是一種用於電子設備的有機磷阻燃劑，如用於計算機顯示器外殼。磷酸三苯脂對水生生物具有急毒性，也是人體血液一個主要酶系統中的強抑制劑。此外，就我們所知，它還能導致某些人的接觸性皮炎，同時也是一種可能的內分泌干擾物質。

通過對酸性工廠上游和下游所採集的類似沉積物樣本進行對比，可以清楚發現污染現象

的本質和範圍源自這些工廠的生產活動。與上游沉積物樣本相比，下游沉積物樣本銻、汞和鎳的含量高了 20 餘倍，鎘和銅的含量高了近 10 倍，而鉛、錫和鋅的含量高了 3 至 6 倍。此外，上游樣本 (pH 值為 6) 僅含有 15 種可萃取的有機化合物，主要為非鹵代碳氫化合物，而下游樣本 (pH 值為 4，即酸性更高) 含有 70 多種化合物，包括鄰苯二甲酸雙酯和 24 種獨立的多溴聯苯同族物質。水和沉積物的酸化以及有毒金屬更大範圍的移動性，都極有可能產生有毒作用，本身預計就會對水生生物產生重大影響。

在貴嶼-南陽公路旁另外兩家酸處理作坊附近的河流沉積物中，也發現了鄰苯二甲酸酯和多溴聯苯及其它有機污染物。正如我們所預料的，從其中一家較大工廠附近的“溢流”區所採集的酸性固體廢物，含有高含量的銅、鉛、錫和銻，而其鎳和銀的含量也相對升高。這些廢物還含有多溴聯苯、聚氯聯二苯和氯化苯，以及一種氯化萘衍生物和一種丙氧化萘衍生物。在其中一種樣本中，還發現了鄰苯二甲酸雙酯。附近河流沉積物具有高酸性，除了鄰苯二甲酸酯外，還含有相同類型的金屬污染物。從同一條河流稍遠離工廠的地方採集對照試樣，發現該對照試樣幾乎不含有機污染物。而該對照試樣中，很多金屬的含量也低了幾百倍。

多氯化萘 (PCN) 是聚氯聯二苯的化學前體，曾廣泛用於電容器及用作電線的絕緣化合物 (此外還有其它用途)。這種化學物質很多屬性與聚氯聯二苯一樣，包括在環境中的持久性、對野生動植物及人類 (可能) 的毒性。有關報道顯示，多氯化萘能夠影響動物的皮膚、肝臟、神經系統及生殖系統。

在新德里 Mandoli 工業區一家小車間內，我們從一台酸處理/酸浸設備上採集樣本，主要用來研究酸浸過程中不同階段的材料和廢物。正如我們所預料的，地面塑料廢物原樣中能夠檢測到的重金屬，在最終用過的酸性廢物中含量非常高 (如，每千克中含有 68 毫克的銻、240 毫克的銅、20 毫克的鉛、478 毫克的鎳、340 毫克的錫和 2710 毫克的鋅)。此外，這些酸性廢料還發現了鄰苯二甲酸酯和氯酚的殘餘物質。

此外，從酸處理設備採集的幾個樣本均含有大量的目前尚未能鑒定的化合物，這些化合物顯示了多鹵化 (也可能為多溴化) 有機化合物的裂解方式特點。還需要開展進一步的研究以便鑒定這些化合物。

在這些車間搬運濃縮的酸性溶液將對人體健康和環境安全帶來明顯的威脅，此外，工人們還表示對於這種用過的濃縮酸性廢水，只是簡單地進行填土處理，這樣也會帶來嚴重的環境威脅。

露天焚燒

我們從貴嶼鎮龍港村的一個垃圾場採集了幾種 (五種) 灰燼和半焚燒電子垃圾的樣本，通過研究分析，發現這些垃圾污染的範圍和程度均存在差異性。這些垃圾中每一種特定污染

物的含量，幾乎都取決於焚燒部件的精確性質以及所採用的焚燒技術。大部分樣本都含有過量的鎘、銅、鉛和鋅。而銻含量尤其高，在五個樣本中，有四種含量在每千克 1000 毫克或以上，而剩下那個樣本的銻含量則達到每千克 15200 毫克。

最後這個樣本中，有害有機污染物的數量和種類也最多，包括多種氯化苯、氯化/溴化苯混合物、2-溴酚、四溴聯苯（為一種多溴聯苯）、3,4-二溴苯乙烯、1,3-二溴丁烷和三種三溴甲苯的異構體。一些特殊用途如某些塑料的阻燃添加劑，可能產生某些或全部此類污染物，但我們也不能排除由於未完全焚化電子產品從而產生一些此類污染物的可能性。此外，在該樣本中還檢測出其它一些有機化合物，包括大量的多環芳烴（PAH，未完全焚化的典型產物）和聚氯聯二苯（PCB）以及其它 10 餘種化合物，這 10 餘種化合物疑似為鹵化化合物，但我們無法進行可靠的鑒定。毒性最強的二惡英同族體即 2,3,7,8-四氯二苯並二惡英（TCDD），隨後由一家合格進行二惡英化學分析的外部實驗室進行分析，並確認其含量。當時我們不可能分析其它樣本是否含有氯化二惡英或分析任何樣本是否含有溴化二惡英（儘管預計可能含有這些物質）。

從新德里（印度）兩個廢物焚燒場（一個位於 Ibrahimpur，一個位於 Shashtri 公園）中採集的灰燼，其特點也是含有高含量的鎘、鉛和鋅。此外，也發現含有明顯的聚氯聯二苯、氯化苯和多環芳烴。

汞（Hg）仍然使用於一些電池和純平電子顯示裝置的照明部件中。以前，汞還用於開關和繼電器。汞及其化合物具有極高的毒性，能夠損壞中央神經系統和腎。一旦進入環境中，汞能夠通過細菌活動轉化成有機的甲基形式，這種甲基形式不但具有毒性，還具有極高的生物積累性。

待處理垃圾的儲存

我們從新德里兩個存放陰極射線管（CRT）的地方（Kantinagar 和 Brijgang）採集了土壤和塵埃樣本。這兩個地方存放了從電視機到計算機顯示器的陰極射線管。研究結果表明，這些土壤和塵埃可能受到來自陰極射線管中重金屬的污染。在陰極射線管內，鎘、鋅和硫化鉍被用作“磷”層，而氧化鉛可以在玻璃上自行產生。陰極射線管存放區的塵埃和土壤，所有這些金屬的含量都被大大提高。

結論

雖然本文顯然不是一份囊括每一國家“電子廢物”回收設施的詳盡研究報告，但以上所綜述的研究結果還是能夠說明該工業行業所帶來的健康和環境問題的寬度和規模。在垃圾處理過程中，對於垃圾和有害化學物質的搬運，人們通常幾乎沒有關注工人或周圍社區的健康和安全，更沒有考慮到環境。總的來說，我們所得到的研究調查結果是，**眾多有毒重金屬和**

持久的有機污染物，對工作場所和鄰近環境造成了嚴重的污染。

很明顯的一點是，我們不可能通過本研究調查結果來評估這些普遍的工作模式可能給人體健康帶來的危害，也不可能對每個工廠所產生的環境影響的方方面面，進行一次全面的調查，或者是在每個國家內對整個行業進行一次全面地調查。但是，本研究調查結果卻表明，在一些地區，接觸廢物流所產生的有害化學物質的現象非常嚴重。爲了鑒定並量化該工業領域所帶來的全面影響，還需要進行更進一步的研究，包括研究工人以及鄰近社區居民的身體健康。

同時，我們所獲得的數據也迫切要求，以上兩個國家必須馬上採取措施，解決工作場所的健康、安全和垃圾管理問題。

本文所調查的問題，常常由於本調查中所採樣地區工作模式不善或缺乏負責的垃圾管理而大大加劇問題的嚴重性。但是，**回收過程各個階段所產生的垃圾受到多種有毒重金屬和持久有機污染物的污染，直接原因是在生產製造階段採用了這些有害材料，這卻是一個不爭的事實。**因此，除了提及應減少不斷增長的大量電子垃圾流所帶來的多種不可見影響外，本文還提出應加大對此類垃圾跨國界流動及回收方式的控制力度，同時還著重指出應對所有新電子產品，進行重新設計和重新配方，以便：

- Ⅰ 益于進行正確的拆解和零部件拆卸，以及
- Ⅰ 從源頭上避免使用有害化學零部件。

歐盟《廢棄電子電氣設備指令》及相關的《有害物質限制條例》在解決這些問題上起到某種作用，但這兩部指令僅適用於歐盟區域，且僅涵蓋電子產品生產所使用的有害物質中的一小部分。

簡而言之，本研究報告進一步闡明了電子產品生產製造商應從產品生產開始至產品壽命終結這一過程中對其產品負責的緊迫性。生產製造商必須開發並設計具有更長壽命的、安全的、便於維修、升級和回收的清潔產品，且不能讓工人和環境暴露在有害化學物質下，這就是生產製造商對這些問題所能做出的主要貢獻。