

土壤及地下水重金屬污染調查
作業參考指引
(104 年版)

出版年份：民國 104 年 8 月
出版單位：行政院環境保護署
EPA-25-III-05B-2015-003

目錄

	<u>頁碼</u>
第一章 前言	1-1
1.1 目的	1-1
1.2 適用範圍與限制	1-1
1.3 指引內容概述	1-2
1.4 中英文專有名詞對照	1-3
第二章 場址環境評估	2-1
2.1 污染物特性與潛在污染源	2-1
2.1.1 污染物特性	2-5
2.1.2 潛在污染來源	2-22
2.2 執行注意事項	2-36
第三章 污染調查規劃	3-1
3.1 場址污染調查規劃	3-1
3.1.1 調查位置	3-2
3.1.2 調查深度	3-5
第四章 調查結果評估	4-1
4.1 污染範圍及體積推估方法	4-1
4.2 污染物演變及傳輸模式之應用	4-3
第五章 品保品管及工業安全衛生	5-1
5.1 品保品管	5-1
5.2 工業安全衛生管理	5-3
5.3 緊急應變	5-3
第六章 國內污染調查案例解析	6-1
6.1 污染事實確認	6-1
6.2 污染範圍調查	6-11

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 3.1-1	二維系統及網格採樣的佈點步驟..... 3-4
圖 4-1	土壤重金屬污染範圍示意圖 4-2
圖 4-2	地下水重金屬污染範圍示意圖 4-3
圖 6.1-2	某鋼鐵廠現場調查狀況圖 6-3
圖 6.1-3	某鋼鐵廠採樣點分佈圖 6-7
圖 6.1-4	某鋼鐵廠土壤及地下水調查結果 6-10
圖 6.2-1	某鋼鐵廠之土壤污染範圍調查採樣配置圖 6-13

表目錄

		<u>頁碼</u>
表 1.4-1	中英文專有名詞對照表.....	1-3
表 2.1.1-1	重金屬基本物化特性彙整表.....	2-5
表 2.1.1-2	常見的砷物種彙整表.....	2-7
表 2.1.1-3	吸附作用影響因子.....	2-17
表 2.1.2-1	產業別與重金屬污染類別之關係.....	2-22
表 2.1.2-2	電鍍的金屬及其鍍浴種類.....	2-25
表 3.1-1	亂數表.....	3-3
表 5.1-1	土壤及地下水重金屬檢測方法.....	5-2
表 5.1-2	土壤及地下水重金屬樣品最少需要量及保存方法.....	5-2
表 6.1-1	某鋼鐵廠背景資料.....	6-2
表 6.1-2	某鋼鐵廠資料審閱項目與異常.....	6-3
表 6.1-3	某鋼鐵廠土壤採樣規劃.....	6-4
表 6.1-4	某鋼鐵廠地下水採樣規劃.....	6-6
表 6.1-5	某鋼鐵廠土壤調查分析結果彙整表.....	6-8
表 6.1-6	某鋼鐵廠地下水調查分析結果彙整表.....	6-9

第一章 前言

1.1 撰寫目的

行政院環境保護署(以下簡稱環保署)「土壤與地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)於民國 89 年 2 月 2 日公告並經 92 年 1 月 8 日與 99 年 2 月 3 日兩次增修，已積極針對全國農地、加油站、儲槽、工廠及非法棄置場址等進行全面性調查，調查結果發現，土壤及地下水污染場址中，以重金屬污染最為嚴重，其次為油品、含氯有機溶劑；除農地主要為重金屬污染外，工廠的重金屬污染亦佔了大部份，顯示工業所造成土壤及地下水重金屬污染的問題是不容忽視的。為提供土壤及地下水重金屬與無機陰離子調查之執行規範，行政院環保署於民國 100 年出版「土壤及下水重金屬及無機陰離子污染物污染場址之初步篩試調查、查證及驗證等之作業參考手冊」，彙整土壤及地下水重金屬與無機陰離子污染物污染場址之調查資料，以供環保機關、專業技術顧問機構執行各場址重金屬與無機陰離子污染調查時，執行之參考依據；並可作為污染行為人、潛在污染責任人及污染土地關係人瞭解重金屬與無機陰離子污染場址調查之程序及方法，以利配合各階段工作之執行。

然而，隨著土污法於民國 99 年的修訂，歷年土壤及地下水污染調查及整治技術的進步，我國污染調查及整治技術手冊撰寫冊數逐年增加。然而，卻仍未有相關手冊撰寫之統一結構，致使用者於閱讀上的困難度提昇。故遵循「土壤及地下水污染調查作業參考指引總則」邏輯架構，使用前小節所述之重金屬與無機陰離子污染物調查工作手冊原有內容，彙整成「土壤及地下水重金屬污染調查作業參考指引(以下簡稱本指引)」。

考量到目前國內無機陰離子污染情況較少，故該污染物相關內容並未納入本指引。透過歷年手冊的法規更新及統一相關指引撰寫架構，以提昇使用者之閱讀便利性。

1.2 適用範圍及限制

一、 本指引設定之使用對象為環保主管機關、目的事業機關、技術顧問

- 機構，以及污染行為人、污染土的關係人等，在土壤及地下水受重金屬污染場址，進行污染調查作業之參考。
- 二、 本指引並未提供有關土壤及地下水之基礎理論，如有該方面的基礎知識，可參考本指引參考文獻。
- 三、 任何關於土壤及地下水採樣及檢測方法，應參照環保署最新公告之標準作業規範。
- 四、 本指引所有內容均以科學與技術層面的解釋為出發點，並著重於如何與實務結合進行場址調查與評估工作。亦不提供各項技術與相關設備儀器之詳細操作步驟。
- 五、 使用者於執行污染調查各階段工作時，所採取之執行方式、採樣佈點位置、數量及分析項目等，仍應視各場址實際狀況及使用者之專業判斷加以決定，本指引中並無強制規範。
- 六、 本指引所列舉之各項快速調查技術，現階段仍僅作為協助污染潛勢研判或篩試之工具。
- 七、 本指引並不代表環保署任何政策或法規之制定方向，也不作為任何法規相關解讀與論證之用。

1.3 指引內容概述

第一章 前言

本章說明本指引之撰寫目的、適用範圍及限制，以及指引內容概述，使讀者可快速地瞭解本指引的撰寫目的及使用方法。

第二章 場址環境評估

本章說明重金屬之污染物特性、土壤及地下水中的特性及影響，以及使用重金屬污染物之產業別、相關製程、污染傳輸途徑，以利污染調查單位於場址環境評估時可針對特定產業別與製程所可能產生之污染途徑進行判斷。

第三章 污染調查規劃

本章說明進行重金屬土壤及地下水調查時初步場址概念模型建立、採樣位置與深度規劃之建議。

第四章 調查結果評估

本章說明根據調查結果修正重金屬污染場址概念模型之方法與污染範圍與污染體之推估。

第五章 品保品管及工業安全衛生

本章說明進行重金屬土壤及地下水污染調查時應注意之採樣與樣品分析品保品管要求與採樣調查中所需注意之工業安全衛生問題，內容包含工作組織管理原則與場址環境衛生管理建議，並提供緊急應變工作規劃之執行方式。

1.4 中英文專有名詞對照

表 1.4-1 中英文專有名詞對照表

英文	中文
Adsorption	吸附
Advection	質流作用
Air rotary	鑽堡
Capillary zones	毛細孔層
Carbonate fraction	碳酸鹽聯結型態
Cation Exchange Capacity (CEC)	陽離子交換容量
Chelate	螯合形式
Complex	複合形式
Conepenetrometer(CPT)	圓錐貫入檢測器
Confined aquifer	受壓含水層
Desorption	脫附

英文	中文
Diffusion coefficient	擴散係數
Dimethylarsenic acid (DMA)	二甲基砷酸
Direct-Push Technology (DP)	直接貫入技術
Dispersion	延散作用
Down-hole laser LIBS	下孔式雷射誘導貫穿光譜
Exchangeable fraction	可交換型態
Fe-Mn oxide fraction	鐵錳氧化物聯結型態
Flame Ionization Detector (FID)	火焰離子偵測器
Hydration	水合作用
Hydrodynamic dispersion	水力延散
Hydrolysis and complexation	水解及錯合作用
Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)	雷射誘導貫穿光譜儀
Light non-aqueous phase liquid (LNAPL)	比水輕非水相液體
Mechanical dispersion	機械延散
Membrane Interface Probe (MIP)	薄膜界面鑽桿(管)
Molecular diffusion	分子擴散
Monomethylarsenic acid (MMA)	一甲基砷酸
Non-metallic inclusion	非金屬之介在物
Organic fraction	有機物聯結型態
Oxidation-reduction reaction	氧化還原作用
Photoionization Detector (PID)	光離子偵測器
Precipitation and dissolution	沉澱與溶解作用
Retardation effect	遲滯作用
Roxarsone	洛克沙生
Sequential chemical extraction	多重化學試劑連續萃取技術
Site Conceptual Model (SCM)	場址概念模型
Toluene	甲苯
X-ray fluorescence (XRF)	攜帶式 X 射線螢光分析儀

第二章 場址環境評估

污染調查評估工作一般可分為污染潛勢評估階段、場址調查作業階段，以及場址污染評估階段。在污染潛勢評估階段，調查評估人員主要是進行資料蒐集、現勘及訪談作業，現勘範圍包括場址內部運作與周界環境的勘查，現勘重點在於潛在污染源的情境描述，經綜合評估研擬調查計畫書，作為現場採樣作業的執行依據。而在調查作業階段，調查評估人員乃依據第一階段之規畫進場執行土壤及地下水污染調查工作，包含地球物理調查、土壤及地下水樣品現場快速篩測與實驗室分析等工作，依其調查結果判定場址是否遭受污染。而在場址污染評估階段，則是根據第一階段與第二階段之成果，完成場址概念模型，清楚說明該場址可能污染來源、污染程度、污染範圍、污染可能傳輸途徑與可能之受體等，俾利規劃後續污染改善作業。上述三階段污染調查評估工作之一般性原則請參考本署「土壤及地下水污染調查作業指引總則」，本指引乃就各階段在重金屬污染調查之特別需注意事項進行說明。此外，為協助污染調查評估人員判識調查場址高污染潛勢區以妥善規劃調查工作，本章亦說明常產生重金屬之產業類型與常見重金屬特性之可能污染物特性與其於土壤及地下水環境中之傳輸反應機制。

2.1 污染物特性與潛在污染源

由於國內工業發展迅速，工業的發展與重金屬的使用息息相關，若因工廠的廢水、廢棄物、廢氣無妥善處理，或製程、操作管理不當、或設備、儲槽、管線洩漏，皆有可能造成土壤及地下水重金屬的污染。產業中，重金屬的冶煉廠，如煉鋅廠、煉銅廠、煉鉛廠等，可能會導致鉛、鋅、銅、鎘、鎳等重金屬污染；皮革毛皮鞣製業，可能會導致鉻污染；塗料或染色製程業，可能會導致鎘、鉻、銅、鉛、鋅污染；電鍍業，可能會導致鉛、鋅、銅、鎘、鎳、汞、鉻等污染；木材防腐業，可能會導致砷、鉻及銅污染；其他如基本金屬工業、金屬表面處理業、半導體業、印刷電路板製造業、電池製造業、基本化學材料業等，皆為可能造成土壤或地下水重金屬污染之工業。

部份的重金屬是人體、動物或植物生長過程中不可獲缺的重要元素，例如鐵、硒、銅、鋅、鉻等，但過量即會導致身體之病變；而部份的重金屬是對人體或生物是有害的，例如砷會導致烏腳病；鎘會導致腎、肺、肝、骨及生殖系統之疾病；鉛會導致血中鉛中毒；汞為有毒物質，會傷害腦、腎臟及肺部等。環保署有鑑於土壤及地下水重金屬的污染將對人體健康及環境危害造成重大的影響，於民國 100 年 1 月 31 日環署水字第 1000008495 號令發布土壤污染管制標準(修正)，於民國 102 年 12 月 18 日以環署水字第 1020109478 號令發布地下水污染管制標準(修正)，明訂砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅等八大重金屬為管制項目，其中 102 修訂之地下水污染管制標準，於重金屬部分增列銻與鉍，此二項目為針對製程使用含銻、鉍原料之行業辦理污染潛勢調查時所需額外檢測項目。

重金屬在土壤及地下水中的型態相當複雜，容易受到土壤中酸鹼度及氧化還原電位的影響；不同種類的重金屬在不同性質的土壤中會產生不同的物理、化學及生物的作用，重金屬容易吸附在土壤的黏土礦物中，亦會受土壤中的無機陰離子所影響而變化。而重金屬對人體健康與環境危害視物質的特性、濃度及暴露的途徑而可能造成不同程度的影響。台灣的工業型態為多樣性，許多製造業的製程皆會產生重金屬之污染物，當污染物經由廢水、廢棄物、或空氣中的落塵等媒介進入土壤後，若累積量超過土壤之涵容能力，將會造成土壤品質劣化，再經過各種途徑進入人體內，影響甚巨。以下就重金屬與土壤的相關性說明。

一、重金屬污染物與土壤性質的相關性

重金屬污染物與土壤性質之相互關係包括：

- (一)重金屬在土壤中之溶解度受 pH 值影響，大部分的金屬離子在 pH 為 5 以下的土壤中溶解度較高。
- (二)有機物含量對重金屬污染物會有吸附作用，土壤有機物含量愈高愈容易形成錯合物，對環境危害愈少。
- (三)土壤黏土含量愈高愈容易被吸附固定，對環境危害愈少。
- (四)土壤質地影響土壤之通氣與排水及污染物之移動、吸附及轉變。
砂質土壤的通氣與排水較好，污染物在其間的移動較快；黏土土壤

的通氣與排水較差，污染物在其間的移動不易。

(五)黏土礦物種類亦影響污染物移動及吸附，不同黏土礦物種類有不同之吸附力及吸附位置，因此會影響污染物之吸附量及未來宿命。

(六)重金屬鉛較不易溶解及移動，不易污染農作物之品質及污染地下水。重金屬銅易與土壤中之有機物質形成錯合物，如有機物少則易溶解及移動於土壤中，較易污染農作物之品質及污染地下水。重金屬鎘與鋅則在一般土壤條件下，易溶解及移動於土壤中，較易污染農作物之品質及污染地下水。

二、重金屬污染物與土壤型態的相關性

重金屬進入土壤後會數種狀態存在於土壤中：(1)以自由金屬離子及可溶的金屬複合物狀態存在於土壤溶液中，(2)重金屬離子佔據土壤膠體的離子交換位置及被吸附於土壤無機物的表面，(3)與有機物鉗合在一起形成錯合物，(4)沉澱或形成不溶的化合物，例如金屬氧化物、碳水化合物及氫氧化合物等，以及(5)存在於含矽礦物中。這些不同的重金屬型態可藉由多重化學試劑連續萃取技術 (sequential chemical extraction) 將其定量分離，包括 (Tessier et al., 1979)：

(一)可交換型態 (exchangeable fraction)：重金屬離子主要是被土壤黏粒、有機物質或非結晶礦物的負電荷靜電吸引力所吸附，屬於鍵結能較弱之部分，容易受到環境中離子強度改變而影響其吸脫附行為。

(二)碳酸鹽聯結型態 (carbonate fraction)：此型態為金屬離子與碳酸鹽類作用而結合，容易受到環境中 pH 值的改變而釋出。

(三)鐵錳氧化物聯結型態 (Fe-Mn oxide fraction)：重金屬離子與氧化物表面產生共價鍵或配位鍵而將重金屬牢牢吸附在土壤表面，鍵結能強，但是在低還原電位或低 pH 值環境下較不穩定。

(四)有機物聯結型態 (organic fraction)：重金屬與多種形式有機物形成鍵結，有機物以複合 (complex) 或螯合 (chelate) 作用將重金屬固定在有機分子內，此部份重金屬可溶性則要視與重金屬結合之有機物分子結構而定。在氧化條件下，有機物可能被破壞而釋放金屬

離子。

(五)殘餘物型態 (residue fraction)：係指存在於土壤原生或次生礦物晶格中的重金屬而言，此部份重金屬除非破壞礦物晶格構造，否則難以釋出。

三、重金屬污染物與無機陰離子的相關性

重金屬造成土壤及地下水污染的主要機制，是重金屬進入土壤中形成游離態離子而溶解在土壤溶液中，藉著在溶液中的擴散或傳流而傳輸，其間會被生物吸收、土壤吸附或反應沉澱，甚或於地下水位較高地區將滲漏至地下水中。土壤對金屬陽離子的吸附能力，隨著 pH 值增加而增加（六價鉻的吸附反應相反），pH 值影響重金屬的吸附性甚鉅，此乃由於 pH 值會同時會影響土壤的表面電荷及重金屬的解離型態與物種（李孫榮，2008）。此外，地表水及土壤中的無機陰離子能與重金屬離子結合，形成較不易溶解的硫酸鹽或磷酸鹽的衍生物，影響重金屬在環境中的遷移和作物的吸收。

瞭解無機陰離子對重金屬脫附特性影響，將有助於掌握重金屬的吸附-脫附機制及其控制措施。相關的研究指出，無機陰離子會影響重金屬在土壤中的吸附行為。Egozy (1980) 的研究顯示土壤黏粒對 Cd^{2+} 的吸附會因 Cl^- 的存在而降低，因而受到無機陰離子 NO_3^- 之影響較不顯著，因為 Cl^- 與 Cd^{2+} 易形成複合物。此外，Elrashidi et al. (1982) 的研究亦探討了在 Cl^- 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 等不同無機陰離子溶液中，土壤對 Zn^{+2} 吸附能力的影響。研究發現鋅會與陰離子形成複合物而減少其在土壤中吸附量，其中又以 SO_4^{2-} 的效應較為明顯。陳蘇等(2008)進行無機陰離子的類型與濃度，對重金屬在土壤中脫附行為的影響研究，結果顯示 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 等無機陰離子的濃度愈大，鎘、鉛的脫附率隨之增加。

林浩潭等 (2008) 採集宜蘭武淵、玉田、南投名間及臺南學甲等砷含量偏高地區的土壤，添加不同型態磷肥，進行土壤中磷對砷脫附之探討。結果顯示，添加 KH_2PO_4 及 K_2HPO_4 的濃度達 20 mg/kg 即可造成土壤中砷的脫附，且添加濃度與脫附量呈正相關，在其試驗添加的磷肥範圍 (20~100 mg/kg) 內，磷肥添加的濃度愈高則砷的脫附量隨

之愈高。而添加過磷酸鈣 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 卻無顯著的砷脫附，研判是土壤溶液中因共同離子效應抑制了 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的溶解，由於 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的溶解度太低，因此沒有足夠的磷酸脫附土壤中的砷。該研究建議於砷含量偏高地區土壤中施用磷肥時，應注意施用量與施用型態，避免土壤中的砷被磷酸脫附而滲濾至地下水或被植物吸收。

以下就重金屬污染物特性、在土壤及地下水中特性、污染物來源，以及國內運作中污染場址勘查等說明於后。

2.1.1 污染物特性

一、重金屬污染物特性

針對環保署土壤及地下水污染管制項目中的重金屬，包括砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅、銻及鉬等 10 項，其基本物化性質如表 2.1.1-1 所示，其特性分別說明如下：

表 2.1.1-1 重金屬基本物化特性彙整表

性質	砷	鎘	鉻	銅	汞	鎳	鉛	鋅	銻	鉬
符號	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	In	Mo
原子序	33	48	24	29	80	28	82	30	49	
原子量	74.9	112.4	52.0	63.5	200.6	58.7	207.2	65.4	114.82	95.94
熔點	817	321	1,860	1,084	-39	1,453	334	420	155	2610
沸點	616	756	2,672	2,567	357	2,732	1,740	907	2000	5560
密度 (g/cm ³)	5.8(灰 砷)， 2.0(黃	8.7	7.2	9.0	13.5	8.9	11.4	7.1	7.31	10.22
分配係 數 logK _d	3.2	2.7	3.8(III) 0.8(VI)	2.5	3.6	2.9	3.7	2.7	不可 溶	1.3

資料來源：

1. 田曉伍、任金霞(譯)，化學元素導覽，世潮出版公司，2004。
2. USEPA, Partition Coefficients for Metals in Surface Water, Soil, and Waste, 2005.

(一) 砷

砷在元素週期表中位於金屬和非金屬之間，原子序為 33，原子量為 74.9。砷的熔點為 817°C，沸點為 616°C，密度為 5.8 g/cm³(灰砷)或 2.0 g/cm³(黃砷)，其導電性差，呈鋼灰色。

工業上砷的使用來源包括了化工、礦產及煉焦等行業；農業上的殺蟲劑、除草劑、飼料及肥料中亦有使用砷。早期的木材防腐事業亦使用砷，有可能污染土壤及地下水，例如環保署於民國 97 年辦理廢棄工廠土地污染調查時，於新竹市原台灣木材防腐工廠發現地下水遭到重金屬砷的污染，其濃度為 5.19 mg/L，達地下水污染管制標準第二類管制值 0.50 mg/L 的 10.38 倍。此外，環保署已於民國 95 年 12 月 29 日公告限制使用鉻化砷酸銅處理木材防腐之用途，以減少民眾直接接觸經鉻化砷酸銅處理之木材，並自 96 年 4 月 1 日起禁止以鉻化砷酸銅處理居家用途木材之防腐，故室內建材、傢俱、戶外桌椅、遊戲場所、景觀陽台、走廊、柵欄及有可能與皮膚直接接觸之用途，都在禁用之列。惟建築物樑柱、地基製材、橋樑結構及基礎接地用材，不在此限。因此，木材防腐製程仍有可能造成砷、鉻、銅等重金屬之污染。

自然界中，砷常與其他元素結合，例如與氧、氯及硫結合成無機砷；或是與碳、氫結合成有機砷，而有機砷的毒性較低。自然界的無機砷存在於岩石中，特別是含銅或鉛礦石，故土壤中的砷多半是由土壤母質風化而來，例如金瓜石的硫砷銅礦、關渡平原的砷鉛鐵礬礦，造成鄰近區域土壤及地下水中砷含量較高，其中，台北關渡平原農地土壤驗出砷污染，追蹤其來源為火山溫泉流經砷鉛鐵礬礦而溶出的自然因素，再加上水稻灌溉的人文因素，經過百年的累積而造成。

砷引起的急性中毒，其呼吸道的症狀有咳嗽、胸痛、呼吸困難及眼花、頭痛，還有胃腸症狀發生前會有極端虛弱的現象。三價砷中毒引起的急性中毒，是由於粘膜嚴重的發炎及微血管通透性大量增加。基於砷的毒性與人體曝露，砷在美國國家優先管制有害物質中排名第一，而國際癌症研究組織(IARC)將砷及其化合

物歸類於第 1 類致癌物質。

砷在地下水體或土壤中的物種型態，包括原子態砷、有機砷及無機砷等三種型態，其中，以無機型態的五價砷(例如俗稱雄黃的 As_4S_4)與三價砷(例如俗稱砒霜的 As_2O_3 與俗稱雌黃的 As_2S_3)為最主要的存在型態，而五價砷與三價砷在環境中相對的分布情形，則受環境中 pH 值與氧化還原電位所影響。一般而言，三價砷比五價砷具有較高的移動性與毒性，因此危害較五價砷大，此外，砷在土壤中的吸附行為主要受鐵鋁氧化物含量、黏土礦物含量、pH 值，以及氧化還原電位等因子決定(環保署，2009)。

無機砷可經由微生物轉化為甲基化的有機砷，例如一甲基砷酸(monomethylarsenic acid, MMA)與二甲基砷酸(dimethylarsenic acid, DMA);或經人工合成為有機砷，例如洛克沙生(Roxarsone)。這些有機砷可再經微生物分解為無機砷，構成砷在環境中的循環(劉文堯、劉正宇，2010)。表 2.1.1-2 為常見的砷物種(Schultz and Joutti, 2007)，主要的物種有 As(III)、As(V)、MMA 及 DMA 等。

表 2.1.1-2 常見的砷物種彙整表

砷物種名稱	化學式
Arsenic trioxide (arsenous oxide)	As_2O_3 (As^{+3})
Arsenopyrite	FeAsS
Sodium arsenite	Na_3AsO_3 (As^{+3})
Arsenic trichloride	AsCl_3 (As^{+3})
Arsine gas	AsH_3 (As^{+3})
Arsenic acid	H_3AsO_4 (As^{+5})
Arsenates (lead and calcium)	PbHAsO_4 (As^{+5}), $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ (As^{+5})
Gallium arsenide	GaAs
Monosodium methane arsonate (MSMA)	$(\text{CH}_3)\text{As}^+\text{O}(\text{OH})(\text{Ona})$
Methylarsonic acid (MMA)	$\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$
Dimethylarsenic acid (cacodylic acid, DMA)	$(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$
Arsenobetaine	$(\text{CH}_3)_3\text{As}^+\text{CH}_2\text{COO}^-$
Arsenocholine (and other arsenolipids)	$(\text{CH}_3)_3\text{As}^+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COH}$

資料來源：Schultz, E. and A. Joutti, Arsenic Ecotoxicity in Soils, Geological Survey of Finland, Miscellaneous Publications, 2007.

(二) 鎘

鎘為銀色金屬，為排名第 67 的豐富之元素；原子序為 48，原子量為 112.4。鎘的熔點為 321℃、沸點為 756℃，密度為 8.7 g/cm³。

鎘的主要污染來源包括了工業採礦和冶金，在國內主要來自硬脂酸鎘的製程廢水、鎘電鍍工廠所排放的廢水或污泥，以及塗料、染色工廠所排放的廢水。

過量的鎘暴露會引起腎、肺、肝、骨及生殖效應，以及癌症，對呼吸系統與心血管系統也有造成危害的可能性。

鎘在土壤或地下水環境中的型態，取決於環境的 pH 值，以及可與鎘形成錯合物的有機或無機陰離子濃度。土壤中對鎘的吸附反應多呈不可逆，故鎘會在土壤中累積，其在土壤中的移動性較銅和鋅高；而在底泥和懸浮固體中，則主要受到鐵錳氧化物所吸附(環保署，2009)。

(三) 鉻

鉻為銀藍色硬金屬，原子序為 24，原子量為 52.0。鉻的熔點為 1,860℃，沸點為 2,672℃，密度為 7.2 g/cm³。元素鉻在地殼岩石組成中排名第 21 名，主要的物種型態有三價鉻與六價鉻兩種。

鉻可在地殼岩石中發現，但其分布與岩性有直接之關係。一般酸性噴出岩（例如花崗岩等），其鉻含量範圍在 20~40 mg/kg，而超基性火成岩（例如純橄欖岩、橄欖岩），其含量範圍為 2,000~3,000 mg/kg，此外，變質岩（例如蛇紋岩）含量亦高（吳家誠，2003）。台灣東部池上地區，土壤母質含有蛇紋岩而致使土壤中含有重金屬鉻與鎳的地質化學特徵。

鉻主要用於鋼鐵、電鍍、皮革等工業，主要污染來源為皮革染整、不鏽鋼、金屬電鍍及化學藥品等製造業。

三價鉻主要存在於礦物中，與鐵錳氧化物共存，對人類的危害較小，且為生物體的必要元素；六價鉻具有極高的毒性，具有強氧化力，於人體內溶解度大，且較三價鉻擴散性大，可穿透細胞膜，毒性遠大於三價鉻，主要來自工業污染廢水中。攝入大量

六價鉻所引起的影響是急性腎小管損傷，碰觸皮膚會引起皮膚表面潰爛。六價鉻已被美國環保署 IRIS (Integrated Risk Information System) 歸類為 A Group，為已證實的人體致癌物質。

自然界中鉻酸鹽很少見，當其在地下水中出現時，表示已受到工業廢水污染。三價鉻在水環境中相當容易形成氧化物、氫氧化物、磷酸鹽沉澱或共沉澱，或是被水中懸浮固體所吸附；在土壤中則因為其存在形式為陽離子，因此容易被土壤中表面帶負電荷的礦物所吸附；相反地，六價鉻存在於自然界中的型態主要是 CrO_4^{2-} 、 HCO_4^- 及 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 等陰離子型態，在土壤中的反應主要有吸附、淋洗至地下水及還原成移動性較低的三價鉻。

(四) 銅

銅為世界上利用量第三大之金屬元素，其熔點為 $1,084^\circ\text{C}$ ，沸點為 $2,567^\circ\text{C}$ ，密度為 9.0 g/cm^3 。銅是熱及電之良導體，自然界地殼中銅濃度約為 70 mg/kg 。

銅主要用於電鍍、電子、印刷電路等方面之工業，而銅的人為污染來源主要包括採礦業、銅純化業、都市垃圾焚化爐，以及電鍍業，電鍍廠多採用硫酸銅或氯化銅鍍浴。

銅為人體必需元素之一，美國環保署 IRIS 歸類為非致癌物，但人體若吸入銅微粒會刺激上呼吸道，產生不適或導致化學性灼傷；若以攝食途徑進入人體則會導致嘔吐，且慢性中毒有導致貧血、白內障及視力衰退的可能。

銅在於環境中有 Cu(I) 及 Cu(II) 兩種氧化態，在環境中可能生成碳酸銅、氧化銅、氫氧化銅等沉澱，亦有可能與鐵生成氧化物共沉澱。銅離子在含水層或土壤中的移動性與一般重金屬陽離子相似，容易被土壤中表面帶負電荷的礦物所吸附而降低其移動性。在土壤中，銅的物種包括土壤溶液中的離子與錯合物、可交換性銅、與腐植質生成錯合物、吸附在黏土礦物與鐵、鋁、錳氧化物表面，以及銅的化合物。

(五) 汞

汞俗稱水銀，銀白色液態金屬，無味，沸點為 357°C ，密度

為 13.5 g/cm^3 ，具有腐蝕性；汞在環境中極富移動性，它在自然界以各種不同的變態並移轉遍及於空氣、水、土壤及生物體中，對人體健康危害極大而且環境污染持久的有毒物質。

環境中人為的汞污染主要來自石化燃料的燃燒、冶礦、廢棄物的焚化，以及含有水銀(例如電池、溫度計、日光燈、水銀燈)的商品等。鹼氯工業是以製造苛性鈉和氯氣為主的工業，而電解食鹽水是其製造過程中主要步驟。當電流通過食鹽溶液時，氯離子游向陽極，放出電子生成氯氣；鈉離子游向陰極，獲得電子成為金屬鈉，此金屬鈉與水起反應生成氫氧化鈉與氫氣。陰陽二極之生成物必須使之隔離，才能分別獲得所要的產品；汞極法就是隔離這二種生成物的最重要方法之一。汞極法係以汞為陰極，以石墨為陽極。陰極產生之鈉與汞結合成鈉汞齊；鈉汞齊在解汞塔中與水作用，產生氫氧化鈉與氫氣。使用汞極法所得之鹼液純度高，不含氯鹽；氫氧化鈉的濃度高，無需蒸發，可節省燃料。汞極法製造的燒鹼，深受用戶歡迎。

汞具劇毒，吸入可能致命；若經由皮膚吸收具危害性，可能危害神經系統、消化系統和呼吸系統；於動物實驗下，可能引起繁殖性影響新生兒行為。在汞的長期暴露下可能產生四肢不自主抖動的症狀，且會傷害腦部、腎臟及肺部；急性的汞中毒會在數小時內頭痛、胸悶、噁心、嘔吐、腹瀉，甚至意識不清以及腎傷害等。

汞在自然界中經生物轉化成甲基汞，而某些特殊細菌則能分解甲基汞使其還原元素態汞；汞在水體中將附著於不溶水的物質或微粒，隨水體流動，最後沉積於水體底泥中，而影響土壤及地下水。汞在環境中主要有元素態、二價汞離子、有機汞、固態微粒汞等型態，其中，元素態汞具有揮發性；傳輸途徑包含從水體與土壤表面的揮發，以及從大氣中沉降至地表上，會受到化學型態與環境因子的條件而有所差異，在水溶液或土壤溶液中，主要以 Hg(II) 和有機汞的形式存在，而在土壤中則以 Hg(II) 為主。

(六) 鎳

鎳為銀灰色或更暗的金屬粉末，固體，無味，熔點為 1,453℃，沸點為 2,732℃，密度為 8.9 g/cm³，不溶於水。

在工業上主要用途為鋼鐵之添加物、金屬合金，主要的污染來源為鎳電鍍工廠之廢水，近年來電池與電子產品及石化燃料的使用亦為污染來源之一。鎳用於電鍍時，多使用瓦茲鎳鍍浴，其成分含硫酸鎳及少數的硼酸與其他光澤劑。

鎳煙會刺激呼吸道，引起咳嗽、呼吸急促及困難，粉塵會刺激眼睛、皮膚，長期與皮膚接觸可能造成過敏發紅。鎳離子對人體的毒性危害，主要是會造成細胞組織壞死，引起過敏性接觸性皮膚炎，雖然美國環保署尚未完成鎳離子的致癌性評估，但是近年來有研究發現鎳精煉廠工人的喉癌、腸癌、組織肉瘤的發生機率，都有增加的趨勢。

鎳元素具有 0、+1、+2、+3 價等氧化態，其在環境中以二價鎳為唯一穩定組態，在自然環境中也以二價鎳為主要型態。由於土壤中的有機酸、鐵鋁錳氧化物與黏土礦物表面對鎳離子有較強的吸附力，因此其在土壤中的移動性較差，且其生物有效性也相當低，對植物危害較低。

(七) 鉛

鉛為青白色、銀色或灰色固體，無味，熔點為 334℃，沸點為 1,740℃，密度為 11.4 g/cm³。重金屬鉛的性質柔軟，具延展性，為電的不良導體，並具高度抗腐蝕性、高原子核截面等物理特性，故成為多用途的金屬。以消耗噸數論，鉛在所有金屬中排名第五，僅次於鐵、銅、鋁、鋅，其製造量遠大於其他重金屬。

鉛在工業上使用廣泛，包括鉛粉製造、塑膠安定劑製造、鉛蓄電池製造、錫鉛熔鑄、色料及釉藥製造、油漆化學製造、塑膠品製造、電線電纜、映像管與日光燈製造、釉藥與色料使用、電子焊錫與電容器噴錫、廢鉛蓄電池回收、拆船及含鉛汽油製造及處理等，容易以粉塵、煙、霧滴等型態散布於空氣中。

鉛進入人體的主要途徑是經由呼吸系統，其次是消化系統與

皮膚黏膜，可能引起急性腦病發作、昏腫，甚至死亡。長期暴露者齒齦會有鉛沉澱的鉛線，引起食慾不振、噁心、口腔有金屬味，便秘、焦慮、關節疼痛、腹痛等鉛中毒現象。一般人血中鉛濃度係小於 $10\text{ }\mu\text{g/dL}$ ，即每 100 毫升血液中鉛濃度小於 10 微克，如果血中鉛濃度大於 $10\text{ }\mu\text{g/dL}$ 表示環境中有鉛污染。我國目前規範鉛作業員工的血中鉛濃度，男性以 $40\text{ }\mu\text{g/dL}$ 、女性以 $30\text{ }\mu\text{g/dL}$ 作為高血鉛個案的通報標準（勞委會北區勞動檢查所，2003）。高血鉛個案應加強防護鉛暴露、調整作業型態與改善環境、定期追蹤血中鉛，並檢查尿液、血液、神經系統及消化系統，以預防勞工鉛中毒。鉛對兒童影響最大的是中樞神經的發育，在血中鉛低濃度之情況下，可能發生心智發展較同年齡兒童差，而當血中鉛濃度超過 $25\text{ }\mu\text{g/dL}$ ，可能阻斷血紅素的合成引起貧血。

鉛具有+2 與+4 價兩種氧化態，而在自然環境中以二價鉛為主要存在的形式。在地下水體或土壤溶液中，鉛離子的活性主要受到環境的 pH 值及碳酸根離子活性所控制。在碳酸根離子存在的情形下，游離鉛離子的濃度甚低，當 pH 值降低時則會使鉛離子濃度增加。另外，與鋅離子相同，鉛的磷酸鹽溶解度低，因此亦可施用磷肥來固定土壤中的鉛。吸附反應為控制土壤溶液中鉛離子濃度的主要機制之一，如同其他重金屬陽離子，有機物、鐵鋁錳氧化物與黏土礦物亦為鉛的主要吸附劑，且鉛與土壤中的腐植酸有相當強的結合能力，所形成的錯合物相當穩定，不易受 pH 值變化所影響。另外，當環境中為還原狀態或是有機酸存在而使得氧化物溶解時，吸附於氧化物上的鉛也會被釋放出來，而會導致鉛的移動性及生物有效性增加，增加其危害性。

(八) 鋅

鋅原子序為 30，是一種淺灰色的過渡金屬，呈灰色塵狀、有光澤粉末狀或錠狀固體，無味，熔點為 419.6°C ，沸點為 907°C ，密度為 7.1 g/cm^3 。鋅是第四種常見的金屬，僅次於鐵、鋁及銅。

鋅主要用於金屬之防蝕、合金生產、顏料、還原劑，主要污染來源為電鍍業所產生的廢水。在鐵板用熱浸鍍鋅可以防止鐵生

鏽，此外，工業上使用鋅合金、熱浸鍍鋅、鍍鋅鋼板、鍍鋅鋼管、鋅酸鈉、冷浸鍍鋅及鋅碳電池等。

鋅離子本身為人體所需的必要元素之一，許多與生長發育有關的人體生化反應都需要有鋅的參與，非致癌物質，但過量則可能傷害人體造血及免疫系統。鋅塵會刺激鼻子、喉嚨、眼睛，並使皮膚乾燥，吞食大量鋅粉可能造成胃炎及嘔吐。

鋅在環境中主要以二價鋅為主要存在的形式，其物種型態可分為溶解態、土壤或底泥中的可交換態、有機物結合的錯合態，以及吸附或沉澱在礦物表面；而在水中的鋅離子主要則是以 $\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ 為主。鋅在土壤中可與有機質形成穩定錯合物，與其他二價重金屬離子相同，有機物、鐵鋁錳氧化物及黏土礦物都是環境中對鋅主要的吸附劑，其在環境中的含量通常決定於鋅的累積量。另外，由於鋅的磷酸鹽具有低溶解度，因此在土壤中施用磷肥可以促進鋅的固定，降低其生物有效性。

(九) 銦

銦(Indium, In)，原子序 49，原子量 114.82，於地殼中的分佈量小且很分散，在地殼中之重量比例約為 0.05 ppm。至今發現的富礦中，只有在鋅、鉛金屬礦物中作為雜質存在。

銦為週期表 IIIA 族光澤銀白金屬元素，銦較鉛軟，

質地柔軟，能用指甲刻痕，其延展性良好，可塑性強。具有獨特的物理和化學性能，如熔點低、沸點高、低電阻、常溫中可與氧緩慢反應形成氧化膜，溶於酸，不溶於鹼，具有抗腐蝕性，在光學上可通過可見光而反射紅外光。所以，被廣泛應用於能源、電子、光電、國防軍事、航空航太、核工業和現代資訊產業等高科技領域，在國民經濟中的作用日趨重要，並且成為現代電子工業中最重要的材料之一。我國主要運作產業包含光電業(TFT-LCD 製造、LED 製造和太陽能電池製造)、廢棄物回收處理業(ITO 蝕刻液回收、含銦廢渣回收等)和金屬冶煉/處理業(銦礦純化)等。

銦雖毒理特性尚不清楚，但文獻指出其可能會刺激眼睛、皮

膚和呼吸系統，導致肺永久性傷害及肺水腫，甚至死亡。此外，銻對動物的肝臟、腎臟和心肌都有毒性作用，急性銻鹽中毒動物的肝臟出現明顯充血、出血及壞死。故目前雖無計算健康風險所需之致癌或非致癌毒性因子，但由於此物質為國內電子、光電及半導體等高科技產業製程使用之化學物質，且於國內地下水已有檢出情形，為避免造成人體可能健康影響與危害，故環保署已於 102 年 12 月開始將銻列為地下水污染管制標準中之管制項目。

(十) 鉬

鉬(molybdenum, MO)是動物及人體的必須微量元素，且具有維持植物對氮之固定與轉變的功能，與維生素 C 合成、光合作用及呼吸作用有關。常用於生產特種鋼、電接觸器、火花插座、X 射線管、燈絲、螢光屏、收錄機，還可用於生產鎢絲、玻璃一金屬焊接、非鐵合金。鉬在自然界中主要存在於輝鉬礦(MoS_2)內，且常與銅礦石共生。

鉬雖毒理特性尚不清楚，在世界各地分布不均勻，缺乏鉬的地區會出現水土病；含鉬量偏高地區(如蘇聯的亞美尼亞)則出現痛風病，且會刺激眼睛鼻子和喉嚨。目前雖無計算健康風險所需之致癌或非致癌毒性因子，但由於此物質為國內電子、光電及半導體等高科技產業製程使用之化學物質，且於國內地下水已有檢出情形，為避免造成人體可能健康影響與危害，故環保署已於 102 年 12 月開始將鉬列為地下水污染管制標準中之管制項目。

二、重金屬在土壤及地下水中特性

影響重金屬污染物在土壤中傳輸型態的主要影響因子，包含土壤 pH 值、氧化還原電位、土壤質地及陽離子交換容量 (Cation Exchange Capacity, CEC)，其中，以土壤之 pH 值影響最鉅。一般而言，正常土壤的 pH 值在 5 至 7 之間，氧化還原電位介於 400 至 -200 mV 之間；而大部分的金屬離子，在 pH 值 5 以下且氧化還原電位小於 100 mV 的土壤中，溶解度較高，相對的移動性也較高。土壤中有機物含量亦決定重金屬於土壤中之移動性，例如，黏土質土壤因有機質含量較高，重金屬易與這些物質產生結合作用，因而重金屬於黏土質土壤之移動性

較砂質土壤較低。重金屬在土壤中之聚積通常以 0 至 30 公分之土壤層為主，但在部份水分充足之粗質地土壤，有可能下移至較深土層（約 60 公分）。

重金屬於土壤的型態可概分為三種：可交換離子態、結合態及固定態。可交換離子呈自由離子態，容易在土壤中移動也是最容易被植物所吸收的型態；結合態則是指重金屬物質在土壤中與碳酸鹽、水合氧化物、有機物質以及硫氧化物結合，伴隨這些物質而移動，並緩慢釋出其量體；而固定態為重金屬最不容易移動型態，與其他物質形成沉澱，或是存在於黏粒及原生礦物之中，植物也最不容易吸收。

重金屬在土壤中影響其移動性之主要作用，含植物吸收、離子交換與吸附、沉澱與溶解、氧化還原、水解或錯合，以及土壤中之移動等。當地下水體流過土壤剖面時，其所攜帶的溶質可能受土壤膠體的吸附或交換而移動，也可能被植物的根及微生物吸收或是沉澱，因此，溶質的運移不只是因土壤水分的流動所造成，亦包括了對應於濃度梯度所引起之分子擴散，以及溶質之間可能的相互作用，甚至和土壤固體基質發生連續性的物理及化學反應 (Mattigod et al., 1981)。茲將重金屬及無機陰離子在土壤及地下水中的傳輸機制、與土壤性質之相關性說明於后。

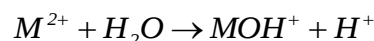
(一) 重金屬在土壤中之宿命

含重金屬溶液滲入土壤後，溶液-土壤雙相間的交互作用，包括水解及錯合作用 (Hydrolysis and complexation)、離子交換 (Ion exchange)、瞬間與動態的吸附(Adsorption)、脫附(Desorption)、沉澱與溶解作用 (Precipitation and dissolution)、氧化還原作用 (Oxidation-reduction reaction) 等。因此，瞭解重金屬在土壤中的傳輸機制，對於重金屬污染物進入土壤後可能造成之危害，是非常重要的，以下就重金屬之傳輸機制說明於后。

1. 水解與錯合作用

土壤溶液之金屬離子(M^{2+})，被轉變成水解物種(hydrolytic species, MOH^+)之過程稱為「水解作用」。水解程度之大小取決於水解作用常數(Ka)及溶液 pH 值，Ka 值愈大表示其愈易水解，pH

值同時也影響到各水解物種的種類及濃度。



金屬離子之水解物種對於土壤固相之吸附性、植物之毒害等不同於自由離子，瞭解金屬離子在水溶液中之水解程度將有助於評估土壤溶液重金屬污染物之行為。

錯合作用為當存在土壤溶液中的有機配位基與重金屬形成不可溶的錯合離子，則會增加其移動性及生物適用性，且不易被吸附在固相。因此，土壤體系之有機質對於重金屬的影響，視其是增加或抑制其移動，將是取決於重金屬與有機物間的錯合反應。

2. 離子交換

土壤的化學特性主要包括土壤的離子交換作用、pH 值及有機質。土壤中的離子交換作用，可分為陽離子與陰離子交換作用。黏土礦物質的表面帶有許多負電荷，可吸附陽離子，吸附的陽離子可被其他陽離子交換取代，此交換取代的能力稱為陽離子交換能力。單位重量土壤所能吸附交換陽離子之總當量即為陽離子交換容量（李芳胤與陳士賢，2007）。

陽離子交換取代的競爭過程中，原則上，帶電荷高者取代帶電荷低者；若電荷相同時，則原子序(或離子體積)較大者具有優勢。此外，濃度可克服以上兩種優勢，例如高濃度的氫離子可取代其他陽離子。

3. 吸附作用

土壤對重金屬的吸附作用，通常分為二種類型，第一類為金屬吸附，也稱為非專一性吸附（nonspecific adsorption），這種吸附作用佔據著土壤正常的陽離子交換點，故也稱可交換性吸附或物理性吸附，具有容易被交換取代的特性；第二類為專一性吸附（specific adsorption），它是由土壤膠體表面與被吸附離子間以共價鍵結合而被吸附之現象，因作用力較大而為不可交換性，故也稱為不可交換性吸附或化學性吸附，相較於非專一性吸附，較不易由土壤固相上被交換取代而脫附（李芳胤與陳士賢，2007）。

吸附又可定義為污染物與土壤的交互作用，其可區分為吸附與吸收（absorption），前者發生在污染物與土壤表面的過程、後

者是指污染物向土壤固體內部擴散的過程，影響吸附作用的主要因素如表 2.1.1-3 所示。此外，土壤與重金屬之間的吸附作用可由土壤的 K_d 值（吸附作用常數）作為指標，土壤 K_d 值愈大，則每單位土壤中重金屬之吸附量也會愈大。

一般而言，於酸性土壤中，重金屬鉛會與鎘或銅共用土壤固體上之一些吸附位置，這些吸附位置上鉛和銅會比鎘較具有選擇性。在重金屬鉛與銅結合系統中，鉛之吸附受到銅存在之抑制，而銅之吸附作用並不會因鉛的加入而降低。重金屬在飽和土壤競爭吸附方面，銅的脫附率皆高於鋅及鎘，此亦證明銅於土壤中之競爭吸附力大於鋅與鎘。

此外，土壤有機質含量高，土壤中重金屬吸附量亦較大，吸容量也相對較大，土壤有機質含量低，則恰好相反。土壤中共存陽離子存在競爭吸附作用，不同研究對於重金屬離子被土壤吸附的選擇性次序有不同研究結果。有的研究認為競爭順序為 $Pb > Cd > Cu > Ni > Zn$ 。另一些研究則提出了如下的順序： $Cu > Ni > Co > Pb > Cd > Zn > Mg > Sr$ 。另外，土壤中 Cl^{-1} 離子之存在會抑制鎘的吸附， SO_4^{2-} 離子之存在則增加鎘的吸附。土壤溫度對其吸附鎘的量有很大影響，土壤溫度升高，鎘的吸附邊界向低 pH 值方向移動。

表 2.1.1-3 吸附作用影響因子

污染物性質吸附的重要特性	影響吸附的重要特性
1. 對水的溶解度	1. 土壤礦物的組成
2. 極性或離子物質	2. 滲透性/孔隙率
3. 辛醇/水分布係數(log Kow)	3. 土壤均質性
4. 酸/鹼化學反應	4. 有機碳含量
5. 氧化/還原反應	5. 表面電荷密度
	6. 土壤顆粒比表面積

資料來源：王一雄等，2001。土壤資源利用與保育，空中大學。

4. 沉澱與溶解作用

沉澱與溶解作用主要是受土壤含水率及 pH 值的影響。隨著 pH 值愈高，重金屬離子則易形成氫氧化物、碳酸鹽或磷酸鹽沉澱，附著於土壤顆粒表面。反之，當 pH 值低時，形成離子及錯和型態存在於土壤中。

5. 氧化還原作用

金屬離子在土壤中由於土壤環境狀態的改變，金屬離子會有氧化或還原的變化，而氧化還原作用受到環境中溶氧量所控制，在土壤環境當中，由於微生物對有機碳的利用，使得土壤中的含氧量隨著土壤的不同而形成濃度梯度。而氧化還原狀態的辨別主要是依據 Eh 或 pE 當作基準，其中 $Eh(mV)=59.2 pE$ ，一般正的數值為氧化型態，負值為還原形態。

對於重金屬來說，氧化還原條件非常重要，氧化還原作用可直接改變重金屬的氧化狀態，進而影響其溶解、吸附、沈澱等作用。在氧化狀態下，可溶性鉛、鎘及鋅濃度皆低於 1 mg/kg，而於還原狀態中，可溶性的重金屬濃度比氧化狀態時稍高。此外，當土壤呈現鹼性(pH 值=8.0)時，重金屬的可溶性很低，這其中 Eh 及 pH 值 為主要因子。當土壤氧化還原電位低於 320~380 mV 時即呈無氧狀態，而低於-150mV 時，土壤中有機值亦進行厭氧反應，開始出現厭氧反應的產物 H_2S 和 CH_4 。

此外，氧化還原作用可透過影響土壤微生物的活性進而改變土壤 pH 值。一般而言，降低氧化還原電位可提升 pH 值，提升氧化還原電位可降低 pH 值，而 pH 值改變的多少又受土壤的緩衝能力而決定。土壤 pH 值是控制鎘有效性的重要原素，鎘的溶解度，移動性和植物吸收會隨 pH 值降低而增加。另外，土壤溶液中的其他離子增加了溶液離子強度，保持了更多的鎘在溶液中。有些離子與鎘形成複合物，大大增加其有效性，舉例而言，氯離子存在與鎘所形成之複合物使其在土壤中更易轉移。

(二) 重金屬在地下水中之傳輸機制

污染物在地下水中會進行各種不同的反應，包括物理、化學

及生物等反應，並會影響污染物傳輸速率與總量，包括：

1. 質流作用(Advection)

土壤水分因高低壓力的不同及乾濕程度的差異而產生移動作用。水穿過土壤中之移動，與推力及土壤對水之傳導性的乘積成正比，當推力及土壤對水之傳導性愈高，則移動性愈顯著。解離於土壤溶液之重金屬隨著土壤水分之整體移動 (Bulk motion)而移動，稱為「質流」，質流之流速 (Flux)，即單位時間流過單位截面積土壤之溶質量，則取決於水流流速和土壤溶液中污染物之濃度。水流流速愈大、土壤溶液中污染物濃度愈大，則質流之流速愈大。

2. 延散作用(dispersion)

延散作用可稱作是一種稀釋的過程，污染物在傳輸路徑上會與原有的地下水混合而達到稀釋的效果，也就是原有的污染團與未受污染的地下水混合。

延散作用又可分為機械延散 (Mechanical dispersion) 與分子擴散 (Molecular diffusion)。機械延散是地下水流的混合及曲折性而造成污染物擴散的現象；分子擴散是不考慮地下水流作用，而直接經由污染物濃度梯度的不同，使得污染團擴散的現象。兩者合稱為水力延散 (hydrodynamic dispersion)。

通常土壤中重金屬污染物之傳輸能力受質流及延散兩大機制所影響，當土壤中水分含量大及流速較快的情形下，土壤溶質之傳輸主要靠質流現象，而於水流速慢的土壤中，重金屬溶解態移動主要受擴散現象影響。分子擴散是污染物由高濃度向低濃度的方向移動，例如溶解於土壤溶液之污染分子或離子會因濃度梯度，而形成擴散行為。擴散速度取決於濃度梯度和污染物在土壤中之擴散係數 (Diffusion coefficient)，濃度梯度愈大則擴散係數就愈大。而這些作用的產生，常會受到土壤與環境因子的牽制與增進，土壤因子包括土壤黏粒含量、有機質的多寡、pH 值、土壤氧化還原電位、導水度及擴散係數等，而環境因子則含降雨及蒸散量等。

最後，重金屬污染物在土壤中之擴散係數通常小於其在水中

之擴散係數，因為土壤液相只佔土壤體積之一部分，而且土壤孔隙之孔道是曲折的。因而當土壤水分含量減少時，液相中能供應擴散之部分體積變小。一般金屬離子，如 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 其在水中之擴散係數約在 3×10^{-6} 至 $10 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 之間。

3. 遲滯作用

遲滯作用包括吸附、分配、離子交換及其他作用，如同上一節所述。重金屬污染物會與含水層中的土壤吸附，導致傳輸的速率減慢，這種現象稱為遲滯作用 (Retardation effect)。此外，帶正電的金屬離子更因大部分土壤表面是帶負電，因此二者間之吸附力更強。

4. 化學作用

污染物在含水層中可能發生的化學反應包括各類水化學的氧化還原反應。

5. 生物反應

含水層中有各式各樣的微生物，在適當的條件下，微生物可利用污染物進行代謝反應，包括好氣與厭氧反應。

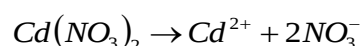
(三) 無機污染物在土壤中存在之型態

一旦無機污染物進入土壤中，一部份可能成為游離態離子而溶解在土壤溶液中，隨水分移動或擴散，一部份可能與土壤黏粒及有機質結合形成不移動相，或是與其它物質產生沉澱亦成為不移動相。例如，以陽離子型態存在的重金屬(鎘、鉻(III)、銅、汞、鎳、鉛、鋅等)，在輸送過程易吸附在懸浮微粒而沉澱，而陰離子型態的重金屬(砷(III、V)、鉻(VI)等)，則以水溶離子狀態存在，而隨土壤中溶液在水平方向與垂直方向輸送。可溶性鹽類亦是以水溶液離子方式存在，易隨水流輸送及散佈。因此，了解無機污染物在土壤中存在的型態，以及在不同型態間轉換的機制，即可了解無機污染物在土壤中的行為，包括移動性、生物可利用性及其毒性。基本上，無機污染物在土壤中的型態含下列幾種類型：

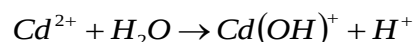
1. 自由離子形態

當無機污染物進入土壤中，可解離成帶正電的金屬陽離子，

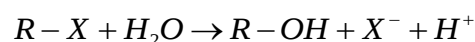
以及帶負電的無機陰離子，例如：



自由態離子在土壤中的活性最高，生物有效性最大，易被植物吸收。由於自由態離子的水溶性大，因此在土壤中的移動性亦大。此外，重金屬離子在土壤溶液中會與水發生水解作用(hydrolysis)，例如：



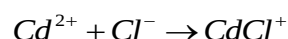
水解程度的大小決定於水解作用常數 K_a 與溶液的酸鹼度 pH 值。無機陰離子也會因為水解作用，從土壤中的有機質轉為自由離子型態，例如：



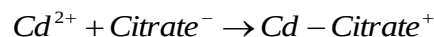
其中， $R-X$ 表示有機質 R 吸附含鹵素、碳、磷或氮的無機陰離子 X 。

2. 離子對或複合物

無機污染物在土壤溶液中解離成金屬陽離子與無機陰離子後，這些離子與水發生水合作用(hydration)而產生水合離子，然後這些水合陽離子與水合陰離子之間，以靜電引力結合在一起而形成離子對，例如：

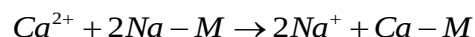


此外，金屬陽離子亦可能與土壤中的有機物形成複合物，金屬陽離子在沒有水分子的情況下，以配位基與有機物發生錯合作用，結合成穩定的複合物，例如：



3. 吸附與脫附形態

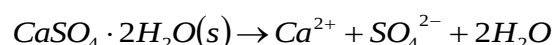
土壤黏土礦物的表面大多帶有負電荷，可以吸附帶正電的金屬陽離子。被吸附的金屬陽離子，其活性降低且變成不移動性。此外，被吸附的金屬陽離子，可與土壤溶液中其他溶解性陽離子進行離子交換作用，然後脫附成為溶解性陽離子，例如：



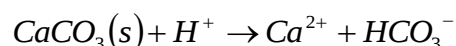
其中， $Na-M$ 表示鈉離子吸附在黏土礦物上。

4. 沉澱與溶解形態

當無機污染物進入土壤，因為鹽類有一定的溶解度，當濃度增加並超過其飽和度時，即產生沉澱，或是土壤溶液中含有相同物種的離子，形成共同離子效應而沉澱。沉澱型態的無機污染物，在土壤中的移動性及生物有效性都會降低。相反的，沉澱無機污染物會經由溶解而成為可移動性無機污染物，例如：



無機污染物中的碳酸鹽、矽酸鹽及鋁矽酸鹽，在弱酸的環境下，會溶解成自由離子型態，例如：



2.1.2 潛在污染來源

重金屬廣泛使用在各種產業中，所使用的重金屬種類依產業的不同而異，各產業別與重金屬之相關性彙整如表 2.1.2-1 所示，以下就金屬表面處理業、鋼鐵冶煉業、印刷電路板業、金屬製品製造業、電池製造業、電線及電纜製造業、皮革整治業等主要產業及其製程概述於后。

表 2.1.2-1 產業別與重金屬污染類別之關係

產業別	鉻	鎘	鋅	鉛	銅	汞	鎳	砷	鈷	鉬
金屬冶煉工業	●	●	●	●	●	●	●	●		
煉油工業(石油化工原料製造)	●	●	●	●	●	●	●	●		
石油及煤製品製造業	●	●	●	●	●	●	●	●		
染顏料及中間體製造工廠	●	●	●	●		●		●		
基本化學材料製造製程	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
鈦白粉製造業	●				●					
金屬表面處理工業(塗裝、電鍍)	●	●	●	●	●		●			●
皮革、皮毛整製業	●	●	●	●	●	●				
鎳、鎘、鉛及水銀電池工業			●	●		●	●			
酸鹼工業			●			●				
農藥、環境衛生用藥製造業								●		
硬脂酸鹽安定劑製造業	●		●	●						
樹脂、塑膠及橡膠製造業					●					
紡織染整工業	●	●			●	●		●		
琺瑯業	●	●				●	●	●		

產業別	鉻	鎘	鋅	鉛	銅	汞	鎳	砷	銻	鉬
肥皂洗衣粉業	●	●				●	●	●		
蒸氣發電廠	●	●				●	●	●		
木材成品業	●	●				●	●	●		
木材保存業	●	●				●	●	●		
汽車及洗衣店	●	●				●	●	●		
煤礦業	●	●				●	●	●		
炸藥製造業	●	●				●	●	●		●
非鐵金屬製造業	●	●				●	●	●	●	●
無機化學製造業	●	●				●	●	●		●
半導體製造製程	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
鋼鐵冶鍊業	●	●	●	●	●		●			
印刷電路板製造製程	●			●	●		●			
電池製造業		●	●	●	●	●	●		●	
電力供應業(燃煤、燃油發電)				●		●		●		
廢棄物處理業	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
半導體製造製程	●	●	●	●	●	●	●	●		
鋼鐵冶鍊業	●	●	●	●	●		●			
印刷電路板製造製程	●			●	●		●			
電池製造業		●	●	●	●	●	●			
電力供應業(燃煤、燃油發電)				●		●		●		
廢棄物處理業	●	●	●	●	●	●	●	●		
光電材料及元件製造業	●							●	●	●
製藥業			●		●				●	●
金屬礦業	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
照相儀器及附屬工業			●		●		●		●	

一、金屬表面處理業

金屬表面處理業依主計處定義為：「從事金屬及其製品之表面磨光、電鍍、鍍著、塗覆、噴焊、烤漆、染色、壓花、發藍、上釉及其他化學處理、塑膠製品表面電鍍之事業。」金屬表面處理係指金屬經初步加工成型後，進一步修飾美化其表面，或改變其表面之機械性質、物理化學性質等之各種操作處理過程，製程說明如下：

(一) 拋光與研磨

此過程中金屬機械製造廠之研磨細粉直接混入排水中在排

出源附近沉積，不會被帶到很遠的地方。

(二) 前處理

此過程所產生的廢液以各種酸液的混合液為主。

(三) 電鍍

電鍍為金屬表面處理業所有程序中，產生重金屬廢液最主要的來源，而依據產品需求不同，所使用的鍍浴種類亦有所差異，表 2.1.2-2 為常見的電鍍金屬及其鍍浴種類。其中，值得留意的焦磷酸銅浴，因為焦磷酸根本身為一還原劑，一旦洩漏到含水層可能會影響含水層的氧化還原態；而表中的鍍鉻浴都是以六價鉻為基礎，其中普通鍍鉻浴摻入少量陰離子，如亞硫酸根 (SO_3^{2-}) 作為催化劑，因此一旦進入土壤中，會遭到淋洗而進入含水層，造成六價鉻的污染。電鍍過程中所產生的廢水及污泥，所含的重金屬種類包含銅、鉻、鋅、鎳、錫等。

(四) 後處理

此過程主要產生以鉻酸為主的重金屬廢液。

二、鋼鐵冶鍊業

依主計處定義鋼鐵冶鍊業為「凡從事礦砂之冶鍊以生產生鐵、合金鐵及直接還原鐵(如海綿鐵、熱鐵塊)，或再以生鐵、直接還原鐵、廢鋼或鑄鋼錠精鍊成碳素鋼、合金鋼等行業均屬之。」台灣地區之鋼鐵冶鍊業包括一貫作業煉鋼廠及電弧爐煉鋼廠，一貫作業煉鋼廠是以鐵礦砂、煤炭及石灰為主要原料，經高爐及轉爐冶煉鑄造成為鋼胚，以供給中游產業進行軋延及加工後生產各類鋼品供下游產業使用；電弧爐煉鋼廠則是以國內回收之廢鐵、廢鋼或是進口之廢鋼料為原料經電弧爐冶煉鑄成鋼胚，其中部分供給中游產業，部分加工後提供下游產業使用。一貫作業煉鋼製造程序之製程特性說明如下：

(一) 原料貯存及輸送

一貫作業煉鋼廠之原料均由卸料碼頭送至原料貯存區堆置，需料時再由料堆輸送至煉焦工廠及燒結工廠。

表 2.1.2-2 電鍍的金屬及其鍍浴種類

電鍍金屬類別	鍍浴種類類	備註
鍍銅	- 氰化銅浴 - 硫酸銅浴 - 焦磷酸銅浴 - 氟硼酸銅浴	氰化銅浴與硫酸銅浴廣被使用
鍍鎳	- 瓦茲鎳浴 - 半光澤浴 - 光澤鎳浴 - 氨基磺酸浴	- 瓦茲鎳浴廣被使用 - 瓦茲鎳浴組成包括硫酸鎳、少量氯化物和硼酸 - 半光澤浴與光澤浴的基本組成與瓦茲鎳浴類似，只是多加光澤劑
裝飾保護性鍍鉻	- 普通鍍鉻浴 - 混合鍍鉻浴 - 自動調節鍍鉻浴	- 普通鍍鉻浴採用硫酸根為催化劑的鉻酸溶液 - 混合鍍液採用硫酸根與氟離子作催化劑的鉻酸溶液 - 以硫酸鋇與氟矽酸鉀作為催化劑的鉻酸溶液
工業用鍍鉻	普通鍍鉻浴	採用普通鍍鉻浴
鍍鋅	- 鹼性氰化物鍍鋅 - 鹼性鋅酸鹽鍍鋅浴 - 硫酸鹽鍍鋅浴	鹼性氰化物鍍鋅浴的效果最佳，過去最廣被使用
鍍錫	- 硫酸亞錫浴 - 氟硼酸亞錫浴 - 氨基磺酸鹽鍍錫	硫酸亞錫浴最廣被使用
鍍錫鉛合金	氟硼酸鹽鍍錫合金	氟硼酸鹽溶液最廣被使用
鍍金	- 鹼性氰化物鍍金浴 - 酸性和中性鍍金浴 - 亞硫酸鹽鍍金浴	鹼性與酸性氰化物均以 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 存在
鍍銀	- 氰化鍍銀浴 - 硫代硫酸鹽鍍銀浴	氰化鍍銀浴仍最廣被使用

(二) 煉焦製程

煉焦的目的為製作煉鐵時所需的還原劑及熱源，也就是焦炭，焦炭因具無煙、火力強、價廉等特性，所以成為煉鐵時最常被使用的熱源。

(三) 燒結製程

燒結工廠乃是以鐵礦砂、細焦炭、助熔劑（石灰石、蛇紋石或白雲石）及其他製程所產生之含鐵固雜料在高溫下進行燒結反應，藉由高溫將鐵礦砂與助熔劑結合，形成堅硬之塊狀燒結礦。

(四) 煉鐵製程

高爐又稱為鼓風爐，為煉鐵（生鐵）設備之主體，其外部以鋼板包覆，內部則以耐火磚堆砌而成，爐之下部裝有熱空氣吹入口，以使熱空氣由下往上吹進入爐內之反應熔解區。

(五) 煉鋼製程

由鐵礦石及燒結礦經高爐還原提煉所得之金屬鐵或生鐵。因在還原鐵礦石之同時其他添加物部分會被還原，易被還原的為鐵、磷，部分被還原的為矽、錳，添加物部分中被還原的為碳、硫等，此部分為生鐵成分；未被還原的有氧化鈣、氧化鎂及氧化鋁，以及部分未被還原的氧化矽及氧化錳，統稱為爐渣。

(六) 連續鑄造製程

將鋼液先澆鑄成鋼錠後，送入加熱爐加熱，然後再軋製成最後產品；而連續鑄造法則省去澆鑄鋼錠的步驟，直接將鋼液連續鑄造成鋼胚，經加熱爐加熱後，再軋製成產品。

(七) 軋鋼製程

鋼具有延展性，在常溫受力時可伸長，亦可延展成薄片，但加熱至赤熱狀態下更易加工成所需要的形狀。鋼之塑性成形法有多種，主要的成形法有軋延、鍛造、擠出、抽伸和深沖等 5 種方法。

一貫作業煉鋼廠之製程區，包括原料貯存區、煉鐵區（包括煉焦

及燒結)、煉鋼區、條鋼工場、線材工場、鋼板工場、熱軋工場、冷軋工場、公用設施區(包括動力工場及氧氣工場)等，各製程區均須用水作為冷卻用途，尚有其他用途包括鍋爐用水、製程用水、洗滌用水、生活用水等，廢水中含有重金屬污染物。

茲將一般電弧爐煉鋼製造程序之製程特性說明如下：

(一) 裝料

原料經初步之分類、秤重後，以天車操作由爐頂加料，將廢鋼裝入爐內。為求縮短煉鋼時間，廢鋼原料應預先加以切細，使爐內廢鋼密度加大，減少裝料次數。

(二) 熔融期

當廢鋼裝入爐內後，即可開始通電。此時由於電極與廢鋼間發生電弧極近爐蓋，為避免爐蓋灼傷過劇，故次級電壓不應過大，應採用中等電壓，當電極鑽入廢鋼中之深度與電極直徑相等時，即可改換最高電壓，輸入最大電力，加速廢鋼熔融，以迄完全熔融。此時溫度已達 1,550°C 以上。

(三) 氧化期

當廢鋼熔落後，即加入氧化劑，以使熔鋼內之雜質氧化與加入之熔劑(如石灰)結成複雜的鹽類爐渣而與熔鋼分離。氧化精煉期中，如熔鋼含磷高，應在較低溫度下進行脫磷作用，所生成高磷爐渣應分離之，以避免復磷。

(四) 除渣

當氧化精煉完成後，所生成之爐渣視渣量多寡而決定分進扒除與否，不扒除渣即屬單渣法，扒渣者即謂雙渣法。本階段所扒的爐渣為電爐之氧化渣，而還原期之出渣，則是電爐廠之還原渣，如後續接盛鋼桶之精煉者，則會有盛鋼桶之精煉爐渣產生。

(五) 還原期

投入石灰、焦炭粉、螢石及少量錳鐵於爐內進行還原精煉，以去除熔鋼含氧及非金屬之介在物(non-metallic inclusion)，同時

也具有脫硫作用。此時視熔鋼成分及鋼種進行造渣。

(六)精煉爐

精煉通常屬於合金鋼廠（特別是不銹鋼煉廠）之程序，國內之其他碳鋼煉鋼廠並精煉爐，而不銹鋼廠之精爐通常利用轉爐進行。

(七)連續鑄造製程

電弧爐出鋼時由盛鋼桶轉接送入連鑄機進行鑄造。連續鑄造之程序是將鋼液連續鑄入鋼液分配器內，其具有穩定流速及分配鋼液鑄道的功能。

(八) 軋鋼製程

國內電弧爐不銹鋼廠中，在連續鑄造製程後，設有軋鋼製程，不銹鋼鋼胚經加熱爐加熱後，經往復式軋延機軋延後，由盤捲機捲成鋼捲，此為熱軋製程，熱軋後之鋼捲經退火、酸洗後，在常溫下以冷軋機軋延成較薄之冷軋鋼片，並再經電解、酸洗、退火至再結晶溫度以調整鋼品材質，最後經調質軋延及冷軋精整成為冷軋成品。

電弧爐煉鋼廠之製程，包括原料貯存、電弧爐、精煉爐、連續鑄造機、軋鋼等單元，均需不同水量之用水，主要用途為冷卻採用循環利用方式，故廢水產生量不大，主要為廢棄物、爐渣中含大量的重金屬污染物。

三、印刷電路板業

依主計處定義「凡從事印刷電路板製造之行業均屬之。印刷電路銅箔基板製造亦歸入本類。」。由於印刷電路板業製程複雜，使用多種化學藥劑及特殊原料，致產生廢水及廢棄物等種類繁多，除含有機污染物外，亦含有銅、鉛及鎳等重金屬。

印刷電路板 (Printed circuit board, PCB) 是依各家廠商之不同需要，而設計出不同之電子線路，再將連接電子零件的線路繪製成電子線路圖，然後再應用印刷、照相、蝕刻及電鍍等技術於印刷電路板上製造出所需之精密電子線路，便可成為支撐電子零組件之基板與各電子

零組件間電路流通之橋樑。一般印刷電路板廠常用之製程略於后：

(一) 裁板

將進貨之基板依據客戶之需求與排版設計利用裁板機進行基板裁切之步驟。

(二) 表面處理

銅箔基板之表面處理方式一般是採用刷磨機與酸洗（微蝕）之方式，來達到清潔銅面之功能。

(三) 內層印刷（內印）

銅箔基板於內印前通常需先用刷磨、微蝕將板面銅箔做適當的粗化處理，增加乾膜與基板之附著力，再以適當的溫度及壓力將乾膜光阻密合貼附其上，經紫外線曝光、產生聚合反應、以顯影液將膜面顯影去除，再用蝕刻液將銅箔侵蝕去除，形成線路。最後再以去光阻液將乾膜光阻洗除。

(四) 壓合

完成內層線路之印製後，電路板則以玻璃纖維樹脂膠片與外層線路銅箔黏合，即為壓合。

(五) 鑽孔

自動鑽孔機方式，鑽出各層間電子線路的導通孔與上件的固定孔，鑽孔之目的在於使板面形成未來電子零組件導線插入之途徑，並做為上下或內外層線路之連通之用。

(六) 一次銅（鍍通孔）

於導通孔壁上鍍一層金屬銅，來完成各層間電路的流通通道。在進入電鍍槽前，要先以刷磨機及高壓沖洗的方式清洗並去除導通孔上的毛頭及孔中的微小粉屑。

(七) 乾膜

於乾膜製程所使用之曝光底片，將線路以外之乾墨進行曝光

，於顯影時將線路部分之乾膜去除，方便下一階段之二次銅程序。

(八) 二次銅 (線路鍍銅)

將原來之銅層將其厚度加厚。印刷電路板經由二次銅之程序後，會再鍍上一層錫鉛合金於銅面上，以做為蝕刻時抗蝕刻之用。

(九) 蝕刻

蝕刻時會將未鍍上耐蝕刻錫鉛合金的銅面全部溶蝕掉，再將蝕刻完成之印刷電路板以剝錫鉛液去除銅面上之錫鉛，如此便完成外層線路之製作。

(十) 濕膜 (防焊)

濕膜之製程是將外層線路完成後之印刷電路板覆蓋上絕緣的樹脂層來保護線路避免氧化和焊接短路，並有防止外界碰撞而傷害板面之功能。

(十一) 噴錫/鍍金

所謂的鍍金是指在電路板的插接端鍍上一層高硬度耐磨損的鎳層及高化學鈍性的金屬來保護端點，以及提供良好接通性能。

(十二) 文字印刷

文字印刷之目的是產品型號、製造廠商資訊、性能等資訊，印製於印刷電路板上，提供資訊給購買者之參考。

(十三) 品檢

印刷電路板廠之品檢單元大致上可以分成為「中檢」與「成檢」，中檢目的是要檢測前製程所完成之印刷電路板是否合格，成檢之目的是在於印刷電路板出貨前做最後檢測與把關工作。

由上述印刷電路板製程，依裁板、表面處理、內層印刷、壓合、鑽孔、鍍通孔、乾膜、線路鍍銅、蝕刻、濕膜、噴錫/鍍金、文字印刷

以及品檢等程序，其製程十分複雜與細密，所使用到的化學藥劑種類繁多，而其製程所產生的廢水除含有多種有機污染物之外，更蘊含大量的銅、鉛及鎳等重金屬。

四、金屬製品製造業

依主計處所定義的金屬製品製造業為：「凡從事金屬手工具、金屬模具、金屬結構及建築組件、金屬容器、金屬加工處理及其他金屬製品製造之行業均屬之。」金屬製品產業包括金屬手工具業、金屬模具業、金屬結構及建築組件業、鋁製品業、銅製品業、粉末冶金業、金屬製成品表面處理業、螺絲、螺帽、螺絲釘及鉚釘業、閥類製造業、鐵皮、金屬皮製品類、金屬容器類、金屬加工處理類，以及其他金屬製品製造業，業別相當廣泛。

金屬製品業產品種類繁多，其製程基本上可分為三大部分：第一部分為金屬機械加工包括車、鑽、銑、磨、裁剪、切削、焊接、成型、鍛造等；第二部分為為達到預期材料使用目的及環境所施予之熱處理；第三部分則是為達到防銹或美觀等目的所做的表面處理，包括前處理、塗裝（包括刷、噴、浸等）、電鍍、無電鍍（化學鍍）、陽極處理、熱浸鍍鋅等。茲將製程分別說明於后：

（一）金屬機械加工

在機械加工過程中不外乎切削加工和非切削加工兩類。切削加工可分為刀具切削工作與磨料研磨工作；刀具切削工作如車削、鉋削、鑽削、銑削、拉削及部分鉗工；研磨則為輪磨、搪光及研光等研磨工作。而非切削加工則有鑄造、塑性加工，如熱作之鍛造、滾磨、引伸、擠製及冷作之抽拉、衝剪、彎曲等。

（二）金屬熱處理

以下說明一般熱處理的基本作業方法及其目的：

- 退火：所謂退火是指把鋼料加熱到適當的溫度，保持適當的時間後使他慢慢冷卻的操作而言。由於退火的目的不同，所採用的加熱溫度或作業條件也不盡相同。
- 淬火：把鋼加熱到適當溫度，保持適當的時間後，將它

急冷，則可以阻止波來鐵變態而得到高硬度的麻田散鐵組織。淬火時所使用的冷卻劑依所需要的冷卻曲線不同而不同，基本上有空氣、水、油、水溶性淬火劑及鹽浴冷卻劑。

- 深冷處理：為一種把材料冷卻到 0°C 以下的操作稱之。
- 回火：淬火後的鋼雖然強度大硬度高，但是很脆不實用。假如把它加熱到變態點以下的適當溫度時，不但可以除去淬火鋼的內部應力，又能調節硬度而得到適當的強韌性。這種處理叫做回火。

(三) 金屬表面處理

金屬製品的表面處理方式種類繁多，包括前處理（包括刷、噴、浸等）、電鍍、無電鍍（化學渡）、陽極處理、熱浸鍍鋅等。此部分製程在金屬製品業中大多採外包加工，尤其產品表面處理是採取電鍍者更是幾乎百分之百，如螺絲、螺帽製造業。

不管採用何種表面處理，基本的前處理都是免不了的。其製程包括素材處理、脫脂、除銹、中和、表面調整、皮膜化成、封孔填平、塗裝工程等，每步驟均各有其增減與其特定方法。

金屬製品製造業在製程中，各單元產生的廢水中含有重金屬污染物成份，廢棄物中有油脂、揮發性有機溶劑，以及重金屬成份之下腳料、污泥等。

五、電池製造業

依主計處公布之電池製造業定義：「凡從事電池製造之行業均屬之，如原電池（內含二氧化錳、氧化汞、氧化銀等）、電力用蓄電池及其零件（隔離板、容器、蓋子）、鉛酸電池、鎳鎘電池、鋰電池、乾（濕）電池等製造。」以鉛蓄電池製造流程為例，說明相關製程於后。

(一) 極板鑄造

本製程係將鉛合金熔融後，灌入格子體（極板）或極柱鑄造之模具內，待其冷卻後，模具自動退出，極板脫模後則落入輸送帶內，經自動剪裁後排列於輸送帶尾端，可能之鉛污染源為融鉛

爐所產生的鉛煙。

(二) 鉛粉製造

將高純度的鉛塊，利用輸送帶送至高溫的電熱熔爐中。鉛塊融化後，流入一細長的冷卻溝內，冷卻為細長的鉛條，此時鉛條會被機器裁切為小的鉛塊，再送至密閉的研磨機內研磨，待研磨至所需的粒徑大小後，由卸料口卸出，較大顆粒之鉛塊，再自動送回研磨槽內繼續研磨。

(三) 塗膏

本製程係將鉛粉與其他製造鉛膏的配方，例如稀硫酸、氧化鉛、其他添加劑倒入練捏槽內攪拌。混合完成後，由於相當黏稠、易乾化，因此使用鏟子將其挖至容器內，再送至塗膏區。最後將練捏所產生之鉛膏，以自動機械塗抹於格子體表面，目的在增加陰、陽極反應面積與蓄電能力。

(四) 化成

本製程係將經過熟成後的陽極板上的二價鉛化合物（例如 PbO ）氧化為二氧化鉛、陰極板上的二價鉛化合物（例如 PbO ）還原為鉛。化成前，作業員工須將熟成後的極板自乾燥室移至化成區，再將格子體排列於化成槽內再通電即可。

(五) 裁板刷板

本作業主要將大格子體依電池規格需求裁切為小格子體。此作業機器以手動密閉式較多，自動壓切裝置出現於少部份工廠中。裁切後將裁板後小格子體上遺留之鉛膏屑或裁切不良所造成之突起物刷除。

(六) 包板

此製程屬組立製程的第一步驟，主要工作是將陰、陽極板交叉疊放成板群，極板之間並以玻璃纖維製的隔離板隔開。

(七) 初步焊接及電極焊接

此製程屬組立的第二步驟，工作內容主要是將模具中，單一板群內同極之格子體以鉛錫合金焊接。待入槽完後，再將各板群焊接使成通路。可能鉛污染源為焊接時所產生的鉛煙。

(八) 入槽

此製程係將已經完成焊接工作的板群置入電池槽中，以便進行板群間的焊接工作。

(九) 加硫酸水

此製程係將已經完成之電池加入硫酸，一般都是採用自動化生產，此時鉛粉塵已經封閉在電池外殼內，除了外殼沾附之鉛粉塵可能再次揚啟外，鉛粉塵危害性已經很小，但可能在於處理硫酸時接觸硫酸而造成傷害。

(十) 充電

一般工廠將電池充電後再行包裝出廠，這項工作包括印刷標示、充電、品管等。

本製程中可能產生鉛暴露來源為卸料衝擊逸散及封蓋時的揚塵，以及廢棄物中含重金屬鉛之粉末、鉛膏等。

六、電線及電纜製造業

依主計處所定義的金屬製品製造業為：「凡從事電線及電纜（包括光纖電纜）製造之行業均屬之。」電線電纜製造業主要產品可歸為裸銅線、漆包線、電子線、電力用電線電纜（電力線纜）及通信用電線電纜（通信線纜）五大類，由於銅具有良好的導電性及延展性，因此製造電線電纜均以銅線作為導線，又依照其用途在外層被覆必須的絕緣材料，如塑膠、橡膠、樹脂漆等。而少數採用鋁為導線之電線，一般均無外層被覆。

各種不同的製程依其產品之需要不同，而有不同的後續加工程序，典型之一貫作業製程，是將電解銅經熔解、澆鑄、軋延製成粗銅線後，再依各種產品之規格予以伸線、集絞或包覆絕緣材。電力用及通信用之電線電纜製程大致相似，銅線經伸線後，依各產品之規格搭配絞線，其中若僅以銅線被覆絕緣皮者即稱之為電線，若多束電線合絞後再被

覆絕緣皮者則稱之為電纜。

其製程中會產生含銅污泥，亦有含重金屬銅之廢水。

七、皮革製作業

依主計處所公布之皮革整製業為「凡從事皮革、毛皮之鞣製、硝製、染整、梳整、壓花、上漆、上蠟，或以熟製皮革下腳為原料從事磨碎、壓製等行業均屬之。」其製程大致上為兩大步驟：

(一) 鞣製：浸水→削肉→浸灰、脫毛→脫灰、酵解→浸酸→鞣製→擠水。

(二) 染色：脫脂→中和→再鞣→染色→加脂削油、鉻鞣、浸酸、染色加脂、固酸。

其製程中用來處理皮革、皮套、皮衣等的鹽基性硫酸鉻，會產生重金屬鉻之廢水。

八、塗料、染色及顏料製造業

依主計處之塗料、染料及顏料製造業定義為：「凡從事塗料、染料及顏料製造及分裝之行業均屬之。瓷釉、油墨之製造亦歸入本類。」其製程大致上為兩大步驟：

(一) 染料顏料製造：乾燥、研磨/混合。

(二) 油墨及塗料製造業生產流程：攪拌、研磨、混合。

其製程中塗料的鎘黃、鎘紅、鉛白等發色材料，以及染色過程中所需用到的重鉻酸鉀、醋酸鉛、硫酸鐵等媒染劑，以及含有重鉻酸鉀與硫酸銅等後處理劑，會產生重金屬廢水。

九、半導體製造業

依主計處所定義的半導體製造業為：「凡從事半導體製造之行業均屬之。包括以下：晶圓製造、電晶體製造、閘流體製造、記憶體製造、積體電路 (IC) 製造、積體電路測試封裝等七項製程均屬於半導體製造業之範圍。」

半導體產業中經製程後所產生的廢水中其種類複雜，使用大量酸液及有機溶劑，而主要產生重金屬廢液的程序為電鍍程序，包含的化

學物質有銅、鎳、鋅、鉛、銀、氰化物、氟化物等。

十、礦產之開採

在採礦或煉製過程中，含重金屬之微塵容易飄散於大氣中，然後經過沉降而進入到土壤中，而採礦所排出的廢水、廢棄物依照所開產的礦區而有所不同，這些污染物質都有可能受到淋洗而使所存的重金屬移出至土壤中。

2.2 執行注意事項

工業重金屬污染土壤及地下水途徑，不外乎廢水、廢棄物及廢氣的不當處理或排放，或含有重金屬溶液原料之儲槽、容器、處理槽或管線的洩漏。因此，在執行現場勘查時，必須特別留意以下各種污染途徑。

一、廢水

一般工廠所產生的廢水來源可分為三類，包括廢棄溶液、製程廢水及排放廢水。

(一)廢棄溶液

為工廠營運過程中，使用相關溶劑進行處理，待製程中使用完不能再使用時，即成為廢棄溶液。以電鍍業為例，以清洗、除銹或脫脂溶液進行被鍍金屬表面的塵土、鐵銹、表面氧化之金屬薄膜及油脂的處理，經過一段時間的處理後，清洗溶液中塵土與金屬鹽類的含量逐漸增加，使溶液漸漸失去清洗的效用，業者一則過濾再生使用，一則加入不同處方補充後再予以利用，若無經濟效益，則以廢棄溶液處理之。

廢棄溶液應依「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」進行貯存，且委託合格之清除處理業者進行清理。若業者貯存不當，導致廢液外流或洩漏，會造成土壤的污染，接而影響地下水；若業者非法排放或灌注，會造成地表水、地下水的污染，接著影響含水層附近的土壤；若業者非法傾倒，會造成土壤的污染，接而影響地下水水質。

(二)製程廢水

一般為工廠製程中，以清水進行物件的清洗所產生的廢水。以電鍍業為例，清洗廢水是製程中，由一個程序到另一個程序之前將附在被鍍物品表面的化學物質清洗乾淨，以免妨害下一個處理步驟而產生的廢水，廢水中含有銅、鎳、鉻、鋅、鎘、鉛、鐵、錫及氰化物等；清洗廢水中污染物的含量雖然較低，但因使用量較大，污染物亦相當可觀。

清洗廢水應依「水污染防治法」要求予以處理至放流水標準後始可排放。若處理單元，例如貯留槽、氧化槽、還原槽、中和槽、調整槽或管線，有任何破裂或損壞，導致廢水外流或洩漏，即造成土壤的污染，進而影響地下水水質。

(三)排放廢水

工廠中的廢水經廠內的處理設施進行處理，達放流水標準後始可排放。

若工廠無適當地處理即非法排放，透過灌溉渠道、工業排水道或污水下水道進入河川、溪流或湖泊，再向下滲透至地下水，即導致地下水的污染，接而影響含水層附近之土壤。此外，若工廠處理廢水符合放流水標準再排放，但因污染物長期累積於土壤或地下水中導致污染濃度超過管制標準，成為潛在污染責任人，亦為地表水、地下水至土壤污染的一種途徑。

二、廢棄物

一般工廠製程中所產生的廢棄物來源可分為二種，一是乾式製程、一是溼式製程。

(一)乾式製程

乾式製程所產生的廢棄物主要為固體廢棄物，如下腳料、集塵灰、爐渣、鑽屑、廢材料、銹皮、廢耐火磚、廢鑄砂等，各業別之廢棄物種類很多，材質亦不相同，部份廢棄物是可再利用回收，部份不能回收再利用。以印刷電路版為例，其廢棄物包括廢邊料、廢銅箔、護膜、鑽屑、廢墊板、廢蓋板及報廢板等。

乾式製程之廢棄物應依「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」進行貯存，且委託合格之清除處理業者進行清理。若業者貯存不當，導致廢棄物逸散，會造成土壤的污染；若業者不當處理或掩埋，甚至非法傾倒或掩埋，會造成土壤的污染，接而影響地下水。

(二)溼式製程

溼式製程的廢棄物主要是含水（液體）製程或廢水處理過程中所產生的污泥、含油污泥、或含酸污泥等。以電鍍業為例，電鍍廢水經化學沉降處理後，所產生的重金屬污泥，其組成多為重金屬之氫氧化物，其組成包括氫氧化銅、氫氧化鉻、氫氧化鎳、氫氧化鋅、氫氧化鎘及不純物，一般先以重力濃縮，然後再予脫水處理，脫水後之污泥餅再予以固化處理。

溼式製程之廢棄物應依「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」進行貯存，且委託合格之清除處理業者進行清理。若業者貯存不當，導致廢污泥外漏，會造成土壤的污染，接而影響地下水；若業者不當處理或掩埋，甚至非法傾倒或掩埋，會造成土壤的污染，接而影響地下水。

三、廢氣

一般工廠製程中所產生的廢氣來源可分為二種，一種是煙囪排放廢氣、另一種則是粉塵溢散或揚塵。

(一)煙囪排放廢氣

由煙囪排放之廢氣主要是工廠製程中需要精煉、熔煉、加溫、加熱，需藉由煙囪將熱予以排放，其間重金屬顆粒、粉塵即伴隨廢氣的排放進入大氣中，經傳送至下風處並沉降地表、水體或植物上，造成環境的污染。以國外金屬鉛冶煉廠為例，排放至大氣中造成鉛污染，影響附近居民健康，兒童血中鉛偏高之案例最多，且距離可達 2 公里之遠。鋼鐵冶煉廠中排放的廢氣成分通常是氧化鐵、氧化鈣、氧化鎂、氯化鋁、氧化矽、氧化鋅及氧化鉛等重金屬。

(二)粉塵溢散或揚塵

工廠製程中有進行金屬研磨處理，或使用到含重金屬粉末時，在作業環境中即容易造成粉塵溢散或揚塵，造成空氣的污染，接而影響土壤及地下水。以鉛蓄電池為例，部份工廠有進行鉛塊的研磨，執行過程或卸料時，可能產生鉛暴露卸料衝擊逸散及封蓋時的揚塵；鉛粉傾倒過程、鉛膏落下動作、風乾之鉛膏粉末、收集乾燥鉛極板時，皆可能有鉛粉塵暴露，若業者在工廠內設置抽氣排氣系統，則含有重金屬之粉塵即排放至工廠外，造成工廠附近土壤的重金屬污染。此外，於室外進行含重金屬粉末之搬運、傾倒或裝載時，亦可能造成揚塵的污染。

四、原料洩漏

一般而言，工廠的原料屬於有價值商品，業者不會隨意廢棄、傾倒或排放；會造成土壤及地下水的污染，大多是含有重金屬溶液之儲槽、容器、處理槽或管線破損所造成的洩漏。以電鍍業為例，依製品而使用不同的電鍍液，例如硫酸、硫酸銅、焦磷酸銅、氰化銅、硫酸鎳、鉻酸溶液、硫酸亞錫、硫代硫酸鹽等，當發生洩漏時，即造成土壤的污染，接著影響地下水水質。

第三章 污染調查規劃

不論為何種污染物質之調查，進行現場調查規劃時不外乎採樣點位的位置、深度與採樣、分析方法的選擇。經第一階段之背景資料蒐集，調查評估人員可根據已掌址的場址基本資料，包括周界環境、地質、土地利用、工廠運作、廢棄物處理與排放、水文地質等，以及污染物的特性、範圍、釋放歷程等，建立場址概念模型(Site Conceptual model, SCM)。在空間上需含括工廠內部與周界環境，在時間上則需含括過往歷史與現況。場址概念模型之建立方式與所需蒐集之資訊可參考本署「土壤及地下水污染調查作業參考指引總則」。建立初步場址概念模型後，即可進行污染調查規劃，內容至少包括土壤及地下水採樣佈點及規劃、水文地質概念模型的建立、採樣分析及品保品管、污染範圍及體積推估方法、污染物演變及傳輸模式等。本章說明進行重金屬污染調查時採樣佈點應注意事項，並針對佈點位置與深度進行原則性建議。

3.1 場址污染調查規劃

場址污染調查規劃視其目的採樣的數量與佈點原則有些許差異，一般兒言可分為兩種目的，一種為污染情形之確認，一種為污染程度與範圍之劃定。針對第一種調查目的，採樣點位通常較少，且佈設之位置乃依具第一階段之場址背景調查資訊，選取污染潛勢最高之區域進行採樣；而第二種污染調查則是在確認場址的確有污染情形後，為了了解污染的嚴重程度與污染範圍，將進行較大範圍的補充調查，此階段之採樣目的為了解污染物之垂直污染深度與水平分布範圍，故採樣時需確認污染範圍邊界，不論是採樣深度或是佈點位置都需達污染範圍邊界，因此採樣深度會更深；佈點範圍會更廣。場址污染調查之一般性原則，請參照本署擬定之「土壤及地下水污染調查作業參考指引總則」與本署「土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法」。而為了節省調查採樣分析成本，近年以發展多種現場快速篩測工具，以土壤重金屬污染而言，可使用攜帶式 X-射線螢光光譜儀(Field portable X-ray fluorescence, 簡稱 XRF)來分析並推估土壤中元素濃度。詳細介紹請參考本署「土壤及地下水污染調查作業參考指引總則」內容。

3.1.1 調查位置

若調查目的為確認事實，則透過第一階段與第二階段之場址背景調查與污染潛勢評估，調查評估人員應以掌握造成污染之可能途徑與原因，同第二章內容所述，工業重金屬污染土壤及地下水途徑，不外乎廢水、廢棄物及廢氣的不當處理或排放，或含有重金屬溶液原料之儲槽、容器、處理槽或管線的洩漏，進行場址調查時宜特別注意下文所提之可能洩漏區域，佈點時可將採樣點規劃於高污染潛勢區域內。常見高污染潛勢區舉例如下：

- 一、化學物原液桶槽、廢棄溶液桶槽放置位置與搬運、清運路線。
- 二、配送管線聯接處或老舊管線處。
- 三、製程區域
- 四、工廠廢水放流水口位置。
- 五、農地灌溉渠道入水口位置。
- 六、廢棄物、廢污泥存放、堆置區域與清運路線。
- 七、煙囪排放廢氣之污染物沉降處

宜了解該工廠之空氣污染防治設備操作情形，取得操作紀錄，必要時可以空氣品質模式模擬污染物之擴散與沉降情形。空氣品質模式之使用可參照行政院環保署公告之「空氣品質模式模擬規範」。

- 八、抽氣、排氣系統排風口位置

台灣地區受重金屬污染區之污染區界定範圍之調查，大都採用平行網路法、矩形網格法、或沿污染來源分佈之極線網格法。系統及網格採樣是採樣位置的決定可根據空間維度，分為一維與二維空間採樣，說明於后。

一、一維空間的採樣

當採樣母體可以很清楚的列出所有 N 個採樣單元時，即屬一維空間的採樣。 N 個採樣單元的標示，適用於以長度作為區隔，每隔固定長度即標示一個採樣單元，例如在放流管線沿線佈點採樣；或以時間

作為區隔，每隔固定時間即標示一個採樣單元，例如每季在特定地點採樣。

採樣的起始點，即第一個單元，可以利用亂數表決定，表 3.1.1-1 為一個典型的亂數表。假設採樣母體有 800 個樣品，欲從中選取 50 個樣品，此時先將 800 個樣品依序編號 001~800，再於亂數表上隨意找一個數字為起始點，接著可以從任何方向（上下左右均可），例如從亂數表第 5 行、第 4 列的數字 1813 往右開始，即 0012 3781 8635 0286 ..。因為母體樣品有 800 個（三位數），故依次選取三位數，得到 181，故第一個樣品點是從編號為 181 的樣品開始，然後依照設定的間隔依序採集樣品。

對於簡單隨機採樣，則可繼續使用亂數表，接著選取相連的三位數字(即 300)作為第二樣品點；然後選第 3 個號碼 123、第 4 個號碼 781，而第 5 個號碼 863 大於 800，因此可將 863 減 800 得 63，得到編號 063 為第 5 個號碼；接著下一個號碼為 502，如此依序直至 50 個樣品號碼選滿為止。詳細說明可參考環檢所公告的「環境採樣規劃設計」(環檢所，2005)。

表 3.1.1-1 亂數表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6824	7709	3937	3289	9545	0620	3904	5203	6590	8769
2	0237	7574	8607	1502	4776	0944	4946	1519	4834	2810
3	1336	8960	2192	7132	9267	4262	6070	7664	7690	3873
4	6840	3016	3991	8582	1813	0012	3781	8635	0286	3932
5	5577	7452	9477	7942	7328	0822	7876	6379	9014	6845
6	3495	3500	9497	8688	7764	0017	1221	5816	8840	8573
7	5163	5127	5955	7826	0982	3563	7783	1575	7738	9146
8	3746	5767	5137	3846	9113	3394	5172	3745	2574	5275
9	0596	6736	4273	7665	8229	6933	6510	0093	4091	4567
10	6553	4267	4071	3532	0593	3874	5368	5295	6303	2629

二、二維空間的採樣

當從二維空間中，以系統網格方法採集土壤樣品時，首先要建立一個矩形座標系統(X 與 Y 軸可能是緯度與經度或等距的網格)，然後隨機設定第一個採樣位置，例如採樣點 1 (座標 X 為 70、Y 為 85)，最後再依照規劃的採樣間隔依序採集樣品。

對於簡單隨機採樣，第二個與其後的採樣位置，均使用亂數表隨機選出，例如採樣點 2 (99, 18)，直至 N 個採樣位置被標定完畢。必須注意的是隨機採樣點不可落在採樣區域以外，如圖 3.1.1-1 中採樣點 3 與 4，應該刪除而不可併入 N 個採樣數內。但是，如果隨機選擇的位置在實際採樣上，無法順利取得樣品時，可改變採樣位置，以代替不易接近的位置。

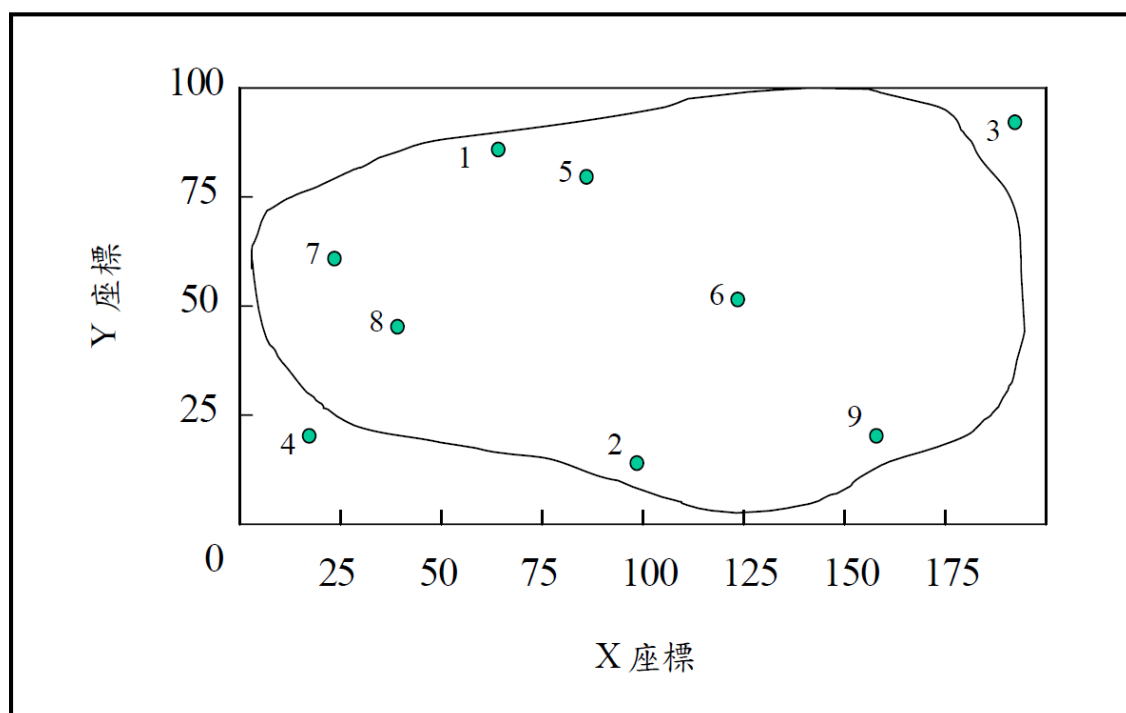


圖 3.1.1-1 二維系統及網格採樣的佈點步驟

而若場址內已發現土壤有明顯的重金屬污染，且土壤偏酸、地下水位偏高，則可依重金屬污染物之特性，評估是否需於土壤污染點附近規劃一口地下水監測井，以確認附近地下水是否有重金屬污染情事；後續再依此監測井地下水檢測結果評估是否需增設其他監測井。

3.1.2 調查深度

一、土壤

一般土壤中重金屬之污染深度常以地表下 0 至 30 公分之土壤為主，因此採樣深度常以採取表土(地表下 0~15 公分)與裏土(地表下 30 公分)為原則。然而，在酸雨的情況或排放廢水 Ph 值小於 5，重金屬易被帶往較深的土壤層。因此採樣仍需視污染情況宜再作不同土層深度之採樣。採樣之深度應參考污染來源、地質水文特性及其於土壤中之傳輸而決定。以下說明淺層土壤採樣與深層土壤採樣方法。

(一)淺層污染採樣：一般重金屬污染之採樣深度為表土（地表下 0 至 15 公分）及裏土（地表下 15 至 30 公分）為主，但亦須評估場址污染特性，決定是否採集地表下 30 至 60 公分的土壤樣品。

(二)深層污染採樣：有些重金屬污染可能為含重金屬之廢水不當滲漏或排放，或不當處理或掩埋所造成，故需進行深層污染採樣以確認是否有重金屬污染情事。當進行深層污染採樣時，採樣過程需注意避免打破含水層之不透水層，以防止污染相鄰之含水層。若需對不同含水層土壤採樣時，需以適當措施（例如皂土回填）避免相鄰之含水層受污染。採取深度之參考方式有三種

1. 分別於可能的污染源位置（例如地表下管線或儲槽埋設深度）及地下水位附近抓取兩種深度的土壤樣品。
2. 將採樣之深度分別設於地表下 0~30 公分處、地表至當時地下水面之中間區處(中間區處採樣深度間距以自地表往下每隔 1.5 公尺至 3 公尺設一採樣點)，以及地下水位上方及下方各 1 公尺之區間處等三個不同之深度。
3. 利用直接貫入技術(Direct push technology)並搭配下孔(down-hole)分析儀，自地表往下採至未發現污染處。針對無機污染物，目前有兩種商業化的偵測系統可供選用：
 - (1) X 射線螢光分析儀係運用 X-ray 能量散發螢光光譜的光電作用(Photoelectric effect)原理，將 X-ray 射入土壤使其中的重金屬元素反射出個別特性之螢光，其中一部分的散射螢

光被 XRF 感測器接收感測出來，並據以定量。USEPA 已公告於 SW-846 的 Method 6200。

- (2) 雷射誘導貫穿光譜儀 (Laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) 係美國國防部之 SERDP 所發展出的探測器，針對產生的雷射光之傳送方式，有兩種不同的 LIBS 探針。第一種型態為光纖雷射誘導貫穿光譜 (Fiber optic LIBS)，係藉由光纖將激發能量由位在採樣車內雷射原傳送到樣品；另一種型態為下孔式雷射誘導貫穿光譜 (Down-hole laser LIBS)，其雷射即直接位在圓錐貫入檢測器 (Cone penetrometer, CPT) 上。

XRF 與 LIBS 此二系統皆可用以偵測、鑑定及確認地表下重金屬之污染濃度達 ppm 水準，其中，LIBS 之偵測極限約 1~10 ppm，適用於未飽和及毛細孔層 (Unsaturated and capillary zones)；XRF 偵測極限約為 100 ppm 以下，適用於未飽和與飽和層。

重金屬污染物因受土壤吸附作用影響，雖不易在土壤中移動，然視需要（如區內有客土、回填土、或需採集受地質影響之背景等）可在調查區內進行剖面分層採樣，其間距以 50 公分為原則，可依調查目的及經費作調整。若調查區內有植栽，則視需要於植栽根部到達深度處採樣。此外，亦可使用簡易的篩試檢測工具輔助現場篩選採樣點及深度，並記錄檢測結果，亦可依專業知識與污染情況而更動採樣點數目與深度。前述篩選測試的數據僅能作為參考，不能作為最終分析結果。

而土壤採樣又可進一步區分為特定深度採樣與連續深度採樣

- (一) 特定深度採樣，主要以可能污染物之深度，或可能洩漏位置下方之深度、或地表表土等為主，如管線埋設深度、貯坑底部之深度、或廢棄物掩埋深度等。
- (二) 連續深度採樣，以土壤連續採樣至地下水位面為主，再以 50 公分為單位，以 XRF 進行篩測，選出重金屬濃度最高，或檢測值有異常的土壤送實驗室分析。若 XRF 檢測結果無發現明顯異常之土壤

點，可採取顏色有異常，或以表土及裡土為主。

若場址內地表下以卵礫石層為主，無法以直接貫入進行連續採樣，若使用鑽堡(air rotary)取得之土壤及礫石碎屑，雖重金屬分析檢測不受影響，但樣品已被干擾，檢測值超過管制標準機率亦降低，不建議進行採樣。

重金屬污染於土壤層移動較緩，應由可能洩漏或掩埋處分層往下採樣；另考量部分工廠可能有廢棄物掩埋情形，故採樣深度應依現場實際作業情形調整。

二、地下水

地下水簡易井之設置深度以應依據土壤質地的變化、不同深度的濃度變化趨勢及地質水文之分佈與流向，適當調整採樣間距及深度。重金屬污染調查地下水以淺層地下水為主，採樣深度以地下水位附近為主要調查重點。若場址現場為卵礫石地質，或地下水位明顯較深(例如地表下 20 公尺)，因重金屬污染的移動性較差，以及土壤對重金屬吸附的特性，對地下水所造成的污染有限，可考量另行研究替代方式進行調查。

第四章調查結果評估

根據現場調查採樣分析結果，場址調查評估人員可進行污染範圍與污染體積推估，以利污染改善的規劃與評估本章首先說明土壤及地下水重金屬污染範圍與體積推估方法與可使用之污染物演變及傳輸模式。

一、污染範圍及體積推估方法

(一) 土壤

因為重金屬易吸附於土壤的黏土顆粒中，不易移動，故在土壤污染場址中，重金屬污染濃度往往是由上而下漸漸變小，主要集中在地表下或洩漏源之土壤附近，較為局部性的污染；即使是不當的掩埋，因重金屬污染移動性不佳，污染亦主要分佈在掩埋區附近，不易擴散或向下滲透。

因此土壤重金屬污染範圍及體積的推估，可經由土壤污染範圍的調查結果，經現場土壤的採樣及實驗室的分析數據，配合土壤污染的深度，繪出污染物的三維分布圖，如圖 4-1 所示；由圖可知污染範圍的分布，故若擬界定土壤重金屬污染的體積，只要計算其所涵蓋的空間分布，即可推算污染物之體積。

此推估方法需建立在土壤重金屬污染範圍調查資料充份，在實際重金屬污染範圍的邊界及污染深度附近，皆而有足夠的採樣點資料可以進行污染範圍的確定。若要節省相關經費，亦可透過 XRF 快篩的方式，在污染區域以網格佈點規劃，同時以連續採樣的方式進行快篩，再與實驗室樣品進行分析比對，使在水平面及垂直面皆可取得充份重金屬污染的資訊，清楚地繪出重金屬的污染範圍，並推估其體積。

(二) 地下水

在地下水污染方面，重金屬易溶於酸，但幾乎不溶於水，一般而言，除非重金屬在酸液中隨酸液的持續擴散，造成地下水大範圍的重金屬污染，否則工廠所造成的地下水重金屬污染，範圍會較侷限在洩漏源附近區域，且離污染源愈遠，其濃度愈低。此

外，重金屬元素狀況穩定，不像有機化合物在地下水中有持續溶解及降解的現象，造成隨地下水的流動而有持續向外圍擴散的情形。

因此地下水重金屬污染範圍及體積的推估，可經由地下水污染範圍的調查結果，經現場地下水監測井的設置及地下水的採樣，以及實驗室的分析結果，繪出污染物的三維分布圖，如地下水重金屬污染範圍示意圖 4-2 所示。由圖可知地下水污染範圍的分布，故只要計算其所涵蓋的空間分布，即可推算污染物之體積。

地下水重金屬污染不易藉由地球物理的探測，協助釐清污染範圍；地下水重金屬污染範圍的推估，需透過設置地下水監測井，採取地下水樣品進行分析，始能得知污染實際分佈範圍，成本耗費上相對較高；且污染範圍的判斷，是由點推估至線，而連接至面，需要專業的判斷評估。此外，要釐清重金屬在地下水污染的深度，除設置不同深度的監測井，亦可利用微洗井的方式，在不同深度的井篩附近採樣分析，藉以瞭解不同深度的重金屬污染情形。

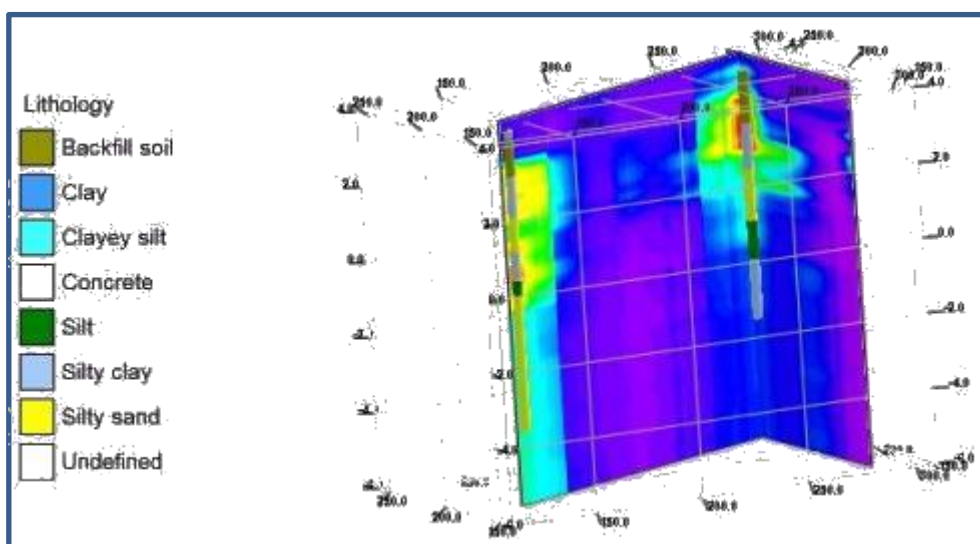


圖 4-1 土壤重金屬污染範圍示意圖

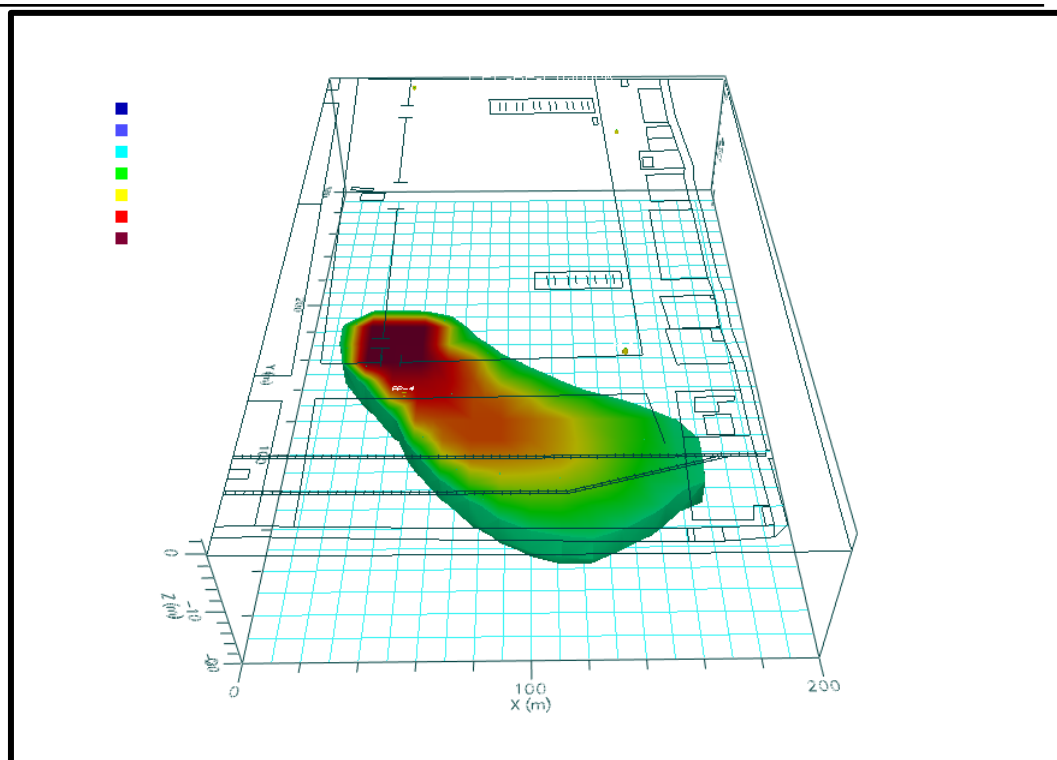


圖 4-2 地下水重金屬污染範圍示意圖

二、 污染物演變及傳輸模式之應用

重金屬污染物與有機污染物特性不同，有機污染物在地下環境中隨物理、化學及生物作用，會產生氧化、還原、降解等反應，使碳數改變，造成化學性質的變化；重金屬污染物相對比較穩定，其在不同的環境中，隨不同重金屬的特性，會產生氧化或還原作用，例如，三價鉻在水環境中相當容易形成氧化物、氫氧化物、磷酸鹽沉澱，或被水中懸浮固體所吸附，在土壤中因以陽離子形式存在，容易被土壤中表面帶負電荷的礦物所吸附；六價鉻在自然界中以 CrO_4^{2-} 、 HCrO_4^{-1} 及 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 等陰離子型態存在，在土壤中的反應有吸附、淋洗至地下水，或還原成移動性較低的三價鉻。

土壤中無機物的反應都是在土壤孔隙水或土壤固體顆粒表面發生的，而且通常反應很快就達到平衡；金屬陽離子在地下水中，會與陰離子等配位基(ligand)形成溶解的錯合物(complex)，例如鎘離子與氯離子的反應， $\text{Cd}^{2+} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{CdCl}^+$ ，一般地下水中重要的配位基為 OH^- 、

CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 NH_3 及 SO_4^{2-} 等，因其濃度較高或因平衡常數(又稱錯合常數)較高；受污染的地下水中，有些人造的有機分子，例如 EDTA，雖然濃度不高，錯合常數卻非常高，只要有微量之 EDTA 存在，且比鎘離子濃度高一點，鎘離子幾乎與 EDTA 完全錯合，沒有自由離子存在。所以地下水中的配位基，除使金屬離子溶解度增加外，亦使金屬離子的活性降低。

因為重金屬在地下水中易被黏土、有機質所吸附，移動性不佳，對於污染物的傳輸模擬較少應用，重金屬污染物的傳輸模擬，可應用 MODFLOW 結合 MT3D 進行，是商業應用相當普遍之傳輸模式。MODFLOW 可以應用於一維、二維及大部分的三維地下水流問題，對於不論是穩態(steady)或是非穩態(unsteady)、受壓含水層或是自由含水層。除了地下水系統本身之外，外來的擾動（包括抽水井抽水、區域補注、蒸發散、河床水位變動及區域排水等）也可以模擬。

第五章品保品管及工業安全衛生

土壤及地下水污染調查作業參考指引總則，已將現場採樣及檢測作業相關的品保品管規範進行一般性原則說明，本指引茲就執行重金屬污染採樣或檢測應注意要項說明，並強調工業安全衛生執行的重要性。

5.1 品保品管

土壤及地下水分析項目需依據環保署公告之各項目分析方法執行，檢測分析之單位必須為環檢所認證核可之檢測機構，且分析項目已取得認證許可，其所分析之樣品始有效力。

檢測分析程序應依所採樣品中可能之污染物選擇適當之檢測方法：

- 一、欲使用之分析方法應預先決定。
- 二、應依據環保署公告之標準方法進行檢測分析。
- 三、檢測項目應依資料審閱、場址勘查與訪談等場址資料綜合評估結果研判擇定，並敘明擇定或排除之理由。

檢測實驗室土壤及地下水重金屬檢測方法彙整於表 5.1-1 所示，依各實驗室構買檢測儀器設備及檢測方法之不同，以環檢所認證核可之檢測方法為主，檢測結果始具法律效力。檢測方法可參照環檢所公告之標準方法為主。在選擇相關檢測方法時，可於環檢所網站(<http://www.niea.gov.tw/>)下載最新的檢測方法，以免誤用。

土壤及地下水樣品重金屬保存方法及需要量彙整如表 5.1-2 所示，樣品需依相關規定取得最少之需要量，並依規定保存，檢測出樣品結果始有效力。

表 5.1-1 土壤及地下水重金屬檢測方法

類別	重金屬項目	檢測方法
土壤	鎘、鉻、銅、 鋅、鎳、鉛	- 土壤中重金屬檢測方法—王水消化法(NIEA S321.63B) - 石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA M113.00C) - 火焰式原子吸收光譜法(NIEA M111.00C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
	汞	- 土壤中總汞-冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA M317.02C) - 固體與液體樣品中總汞檢測方法—熱分解汞齊原子吸收光譜法(NIEA M318.00C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
	砷	- 土壤中砷檢測方法—砷化氫原子吸收光譜法(NIEA S310.63C) - 石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA M113.00C) - 火焰式原子吸收光譜法(NIEA M111.00C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
地下水	鎘、鉻、銅、 鋅、鎳、鉛	- 水中金屬檢測方法—石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA W303.51A) - 水中銀、鎘、鉻、銅、鐵、錳、鎳、鉛及鋅檢測方法—火焰式原子吸收光譜法(NIEA W306.52A) - 水中金屬及微量元素檢測方法—感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA W311.51B)
	汞	水中汞檢測方法—冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA W330.52A)
	砷	- 水中砷檢測方法—自動化連續流動式氫化物原子吸收光譜法(NIEA W434.53B) - 水中砷檢測方法—批次式氫化物原子吸收光譜法(NIEA W435.52B)

表 5.1-2 土壤及地下水重金屬樣品最少需要量及保存方法

類別	重金屬項目	最少樣品量	保存容器	保存方法	保存期限
土壤	鎘、鉻、銅、 鋅、鎳、鉛、 砷	500g	玻璃或塑膠袋(瓶)	室溫	180天
	汞	100g	玻璃或塑膠袋(瓶)	4±2℃	28天
地下水	鎘、鉻、銅、 鋅、鎳、鉛、 砷	500ml	塑膠容器	水樣以過濾SS濾紙過濾，加入濃硝酸使水樣pH < 2.0，樣品置於暗處4℃冷藏	180天
	汞	250ml	棕色玻璃容器	水樣以過濾SS濾紙過濾，加入低汞硝酸使水樣pH < 2.0，樣品置於暗處4℃冷藏	儘速

5.2 工業安全衛生管理

執行調查具有不確定之潛在危機，稍有不慎，即可能發生意外。為避免人員傷亡，針對參與調查作業之現場工作調查人員進行周詳之安全防護規劃，為調查工作之首要原則。因此，評估調查人員應根據「土壤及地下水污染調查作業參考指引總則」所述之工業安全衛生管理原則，研擬油品污染場址調查之管理對策。

5.3 緊急應變

緊急應變計畫措施研擬，須根據「危險性工作場所審查暨檢查辦法-附件四」緊急應變計畫規範，至少必須包含以下內容：

一、緊急應變運作流程與組織

(一) 應變組織架構與權責

(二) 緊急應變控制中心位置與設施

(三) 緊急應變運作流程與說明

二、緊急應變設備之置備與外援單位之聯繫

三、緊急應變演練計畫與演練記錄(演練模擬一般及最嚴重危害之狀況)

四、緊急應變計畫之修正。

第六章 國內污染調查案例解析

為讓使用者瞭解國內污染調查情況，本指引挑選污染事實確認及污染範圍劃定之案例說明於后。

6.1 污染事實確認

在污染事實確認工作，如土壤及地下水污染調查參考指引總則第二章流程所述。首先，進行場址環境評估，審閱相關背景資料、現場勘查及人員訪談，進行污染潛勢的評估。如有污染之虞者，則進行下一步的污染調查規劃以確定污染事實。各階段工作成果說明如下。

一、場址環境評估

(一) 背景資料蒐集

某鋼鐵公司為金屬基本工業，從事鋼鐵裁切及熱浸鍍鋅等作業。本次調查工作為釐清民眾陳情，確認是否有土壤及地下水污染情形。場址之背景資料彙整於表 6.1-1。

(二) 資料審閱與現場勘查

以下針對資料審閱、現場勘查執行工作或發現之異常情形說明如下。

1. 資料審閱

資料審閱項目與發現異常彙整如表 6.1-2。

2. 現場勘查異常

該場址佔地面積約○○平方公尺，原場址現在為一空置荒廢的工廠，關廠後並無其他工廠進駐。廠區內廠房、設備均已拆除，現場僅保留辦公室，廠區無人看守。廠區內堆置廢棄物，主要以建築廢棄物為主，並有部分太空袋包裝之製程廢棄物。現場調查狀況如圖 6.1-2 所示。

表 6.1-1 某鋼鐵廠背景資料

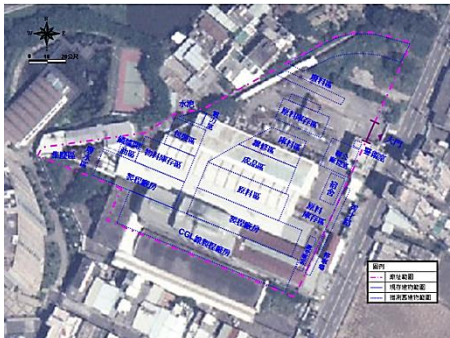
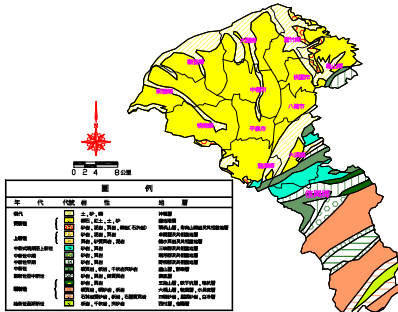
項目	場址資料說明
使用沿革	► 該鋼鐵廠於民國○○年成立，從事鋼板、銅材、浪型鋼板、輕量型鋼等之裁剪加工作業。
平面配置	
水文地質	 (資料來源：經濟部中央地質調查所) ► 根據經濟部水利署於本區域之水文地質調查資料顯示，場址位於桃園中壢台地東部，屬紅土台地堆積層，含水層主要分為兩層。上層含水層為階地礫石層，以晚更新世紅土礫石層為主；下層含水層為更新世楊梅層，主要由陸相礫石堆積而成的，向海側方向則是逐漸變細，變成以海相砂泥層地層為主。
地下水	► 本場址位於楊梅鎮南側，社子溪上游支流秀才窩溪與老坑溪分別於場址東側約300公尺處及西方約1000公尺處，由南向北流經，並於場址北方約2000公尺處匯入社子溪本流，屬社子溪流域。 ► 本場址位於桃園中壢台地地下水分區，區域地下水流向由東南向西北，依其2005年2007年地下水監測資料，本區域地下水位約在地表下2.5至6.5公尺間，地下水監測無發現明顯異常。
環境敏感區	► 經查詢環保署資料，本場址位於水質水量敏感地（有限度開發）及自然景觀敏感地區（河谷及林地）。

表 6.1-2 某鋼鐵廠資料審閱項目與異常

資料來源		審閱內容說明
環保局相關紀錄		該縣環保局資料顯示，該鋼鐵廠曾於○○年間排放廢污水，造成當地里民污染糾紛，其附近地下水經調查報告顯示有重金屬污染情形。
其他政府機關紀錄	地籍資料	地籍資料、土地登記謄本、地籍圖謄本
	工廠設立資料	該鋼鐵廠於民國○○年○○月○○日核准設立，代表人為○○○，資本額為新台幣○○○○元整。
	災害紀錄	經查詢經濟部技術處委託工研院建置之事故資料庫檢索系統，查詢火災、化災等災害歷史紀錄，該鋼鐵廠無相關災害紀錄。
	地下水、土壤污染紀錄	經查環保署水質監測資料統計查詢系統之○○國小地下水監測站(測站編號4630，距本廠東北方約1,900公尺)，○○年至○○年之監測資料，本區域之地下水水位約位於地表下2.5至6.5公尺，地下水質錳、氨氮等一般項目濃度高於第二類地下水水質監測基準，其餘一般項目及重金屬均正常。本區無土壤相關資料。



廠房現已全部拆除



廢水處理廠，已被棄物掩埋



原包裝區，現堆置太空包

圖 6.1-2 某鋼鐵廠現場調查狀況圖

(三) 污染潛勢判定

依上述環境場址評估流程、內容及結果，進行全面性的整合分析。

1. 污染範圍評估

本場址潛在土壤或地下水污染區域主要有 8 處：

- (1) 原熱浸鍍鋅廠房。
- (2) 原製程廠房。
- (3) 廢水處理區。
- (4) 集塵區。
- (5) 原油區。
- (6) 原水池。
- (7) 原廢料區

(8) 原包裝區堆置廢棄物。

2. 潛在污染物質

依據場址運作紀錄，潛在污染物質主要為重金屬、VOCs、SVOCs 及 TPH。

二、污染調查規劃

依據本廠廠區配置圖，高污染潛勢區主要包括熱浸鍍鋅廠房、原製程廠房、廢水處理區、集塵區、油區、水池、廢料區及原包裝區等。故污染調查規劃以上述位置為重點區域。

(一) 研擬污染調查規劃

土壤及地下水採樣點依本廠高污染潛勢區分布進行佈點，由於該場址之廠房已完全拆除，地面堆置許多建築廢棄物且有許多積水坑洞，現場採樣或設井時將依現場實際情況調整。土壤及地下水污染採樣數量、方法、深度及檢測分析，彙整如表 6.1-3 及表 6.1-4，採樣點分佈如圖 6.1-3。

表 6.1-3 某鋼鐵廠土壤採樣規劃

類別		土壤採樣規劃
採樣位置	S-01	原熱浸鍍鋅廠房內 (pH、重金屬)
	S-02	原熱浸鍍鋅廠房內 (pH、重金屬、VOCs、SVOCs)
	S-03	原製程廠房內 (pH、重金屬、VOCs、SVOCs)
	S-04	原廢料區 (pH、重金屬)
	S-05	原水池 (pH、重金屬)
	S-06	原包裝區堆置廢棄物附近 (pH、重金屬)
	S-07	原油區附近 (pH、重金屬、TPH)
	S-08	原廢水處理區附近 (pH、重金屬、TPH)
	S-09	原集塵區附近 (pH、重金屬)
採樣方式		▶ 土壤採樣方法(NIEA S102.63B)。 ▶ 其中土壤重金屬及TPH採抓樣方式，以直接貫入採樣機，利用內襯薄管之取樣器採取較不擾動樣品
採樣深度		採樣深度以達地下水水位面以上為原則
檢測分析項目及方法	鎘	土壤中重金屬檢測方法—王水消化法(NIEA S321.63B)
	鉻	
	銅	

表 6.1-3 某鋼鐵廠土壤採樣規劃 (續)

類別		土壤採樣規劃
	鉛	
	鋅	
	鎳	
檢測分析項目及方法	砷	土壤中砷檢測方法－砷化氫原子吸收光譜法(NIEA S310.63C)
	汞	▶ 土壤中總汞-冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA M317.02C) ▶ 固體與液體樣品中總汞檢測方法－熱分解汞齊原子吸收光譜法(NIEA M318.00C)
	苯	土壤、底泥及廢棄物中揮發性有機物檢測方法－氣相層析質譜儀法 (NIEA M711.02C)
	四氯化碳	
	氯仿	
	1,2-二氯乙烷	
	順-1,2-二氯乙烯	
	反-1,2-二氯乙烯	
	1,2-二氯丙烷	
	乙苯	
	1,2-二氯苯	
	1,3-二氯苯	
	四氯乙烯	
	甲苯	
	三氯乙烯	
	氯乙烯	
	鄰-二甲苯	
	間,對-二甲苯	
	總石油碳氫化合物(TPH)	土壤中總石油碳氫化合物檢測方法－氣相層析儀/火焰離子化偵測器法 (NIEA S703.62B)
	3,3-二氯聯苯胺	半揮發性有機物檢測方法－毛細管柱氣相層析質譜儀法(NIEA M731.01C)
	六氯苯	
	五氯酚	
	2,4,5-三氯酚	
	2,4,6-三氯酚	

表 6.1-4 某鋼鐵廠地下水採樣規劃

類別		地下水採樣規劃
採樣位置	W-01	原熱浸鍍鋅廠房內 (重金屬)
	W-02	原包裝區堆置廢棄物附近 (重金屬、VOCs、SVOCs)
	W-03	原廢水處理區旁 (重金屬、VOCs、SVOCs)
採樣方式		地下水採樣將依據環保署公告之「地下水水質監測井設置作業原則 (環署土字第1020112290號)」設置標準監測井後，依據監測井地下水採樣方法(NIEA W103.54B)進行。
檢測分析項目及方法	鎘	水中金屬及微量元素檢測方法－感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA W311.51B)
	鉻	
	銅	
	鉛	
	鋅	
	鎳	
	砷	水中砷檢測方法－自動化連續流動式氫化物原子吸收光譜法(NIEA W434.53B)
	汞	水中汞檢測方法－冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA W330.52A)
	1,1-二氯乙烷	水中揮發性有機化合物檢測方法－吹氣捕捉／氣相層析質譜儀法 (NIEA W785.55B)
	順-1,2-二氯乙 烯	
	反-1,2-二氯乙 烯	
	四氯乙烯	
	三氯乙烯	
	氯乙烯	
	甲苯	
	苯	
	萘	
	四氯化碳	
	氯苯	
	三氯甲烷	
	氯甲烷	
	1,4-二氯苯	
	1,1-二氯乙 烯	
	1,2-二氯乙 烷	
	3,3-二氯聯苯 胺	水中半揮發性有機化合物檢測方法－氣相層析質譜儀法 (NIEA W801.52B)
	六氯苯	
	五氯酚	
	2,4,5-三氯酚	
	2,4,6-三氯酚	

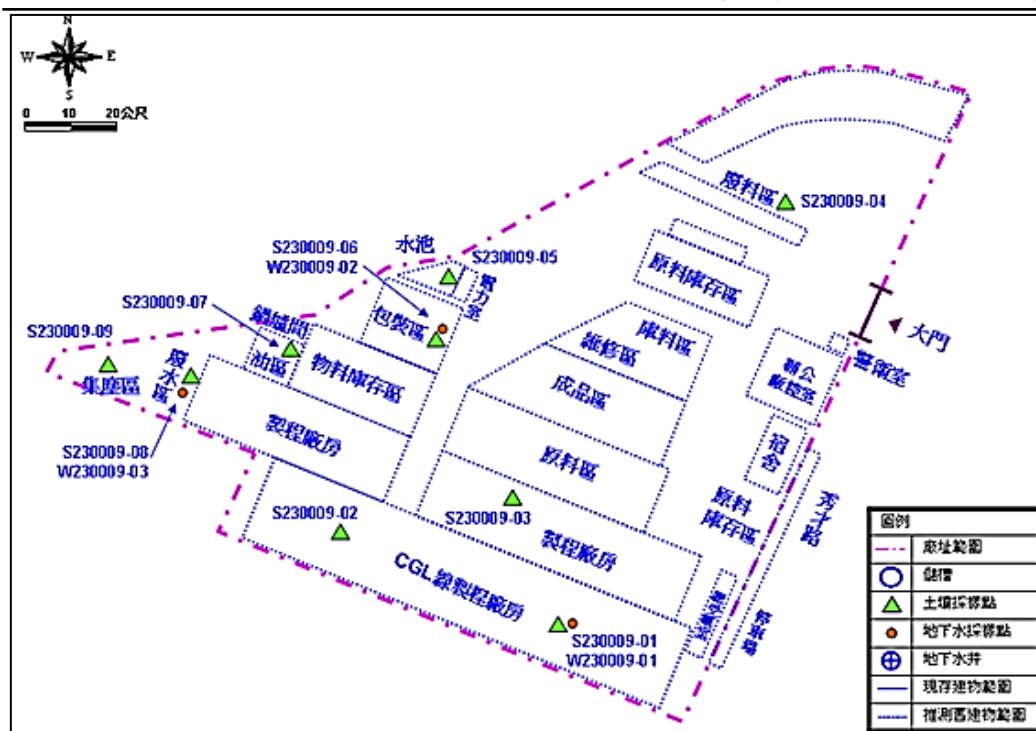


圖 6.1-3 某鋼鐵廠採樣點分佈圖

三、污染事實確認

茲將實驗室分析結果依土壤及地下水彙整如表 6.1-5 及表 6.1-6，場址調查異常區域圖如圖 6.1-4，異常說明如下：

- (一) 於土壤現場調查過程中，S-3 點 XRF 檢測鋅 14,600mg/kg 偏高，PID 及 FID 則無明顯異常。
- (二) 由本場址調查結果顯示，在土壤方面，原熱浸鍍鋅廠房附近 S-03 點重金屬鋅(18,300mg/kg)超過管制標準(鋅 2,000 mg/kg)；S-02 點重金屬鋅(1,370 mg/kg)超過監測基準(鋅 1,000 mg/kg)。有機檢測項目方面，僅針對 S-02 及 S-03 點進行 VOCs 及 SVOCs 檢測分析，VOCs 項目皆無檢測出；SVOCs 於 S-03 點檢測出鄰苯二甲酸乙己脂 Bis(2-ethylhexyl) phthalate 39.9mg/kg，其他項目皆無檢測出。TPH 針對原油區及原廢水處理區 S-07 及 S-08 點進行分析，皆無檢測出。此外，位於原油區附近之 S-07 點之 pH3.6、導電度 1,220 μ mho/cm25 $^{\circ}$ C，有較其他地區偏酸或偏高之趨勢。

(三)在地下水方面，3 口簡易井地下水重金屬皆未超過管制標準及監測基準；2 口簡易井 W-02 及 W-03 井檢測 VOCs 及 SVOCs，皆無檢測出。

表 6.1-5 某鋼鐵廠土壤調查分析結果彙整表

檢驗項目	管制標準	S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06	S-07	S-08	S-09
砷	60	5.79	7.43	8.6	8.77	9.24	7.9	15.2	6.41	8.77
鎘	20	ND	ND	0.62	ND	ND	ND	ND	ND	ND
鉻	250	21.4	38.6	69	44.1	37.4	37.3	33.4	37.3	30.2
銅	400	14.1	15	41.1	22.6	15.5	30.4	14.6	22.1	18.7
鎳	200	16.1	29.2	66.9	26.9	26.8	19.4	21.1	21.9	18.3
鉛	2,000	18.6	24.6	231	36.6	24.6	30.5	27.6	42.3	15.5
鋅	2,000	164	1,370	18,300	212	73.4	114	172	83.8	40.9
1,2-二氯苯	100	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
1,2-二氯乙烷	8	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
1,2-二氯丙烷	1	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
1,3-二氯苯	100	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
苯	5	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
四氯化碳	5	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
氯仿	100	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
順-1,2-二氯乙烯	7	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
乙苯	250	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
二甲苯	500	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
四氯乙烯	10	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
甲苯	500	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
反-1,2-二氯乙烯	50	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
三氯乙烯	60	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
氯乙烯	10	—	ND	ND	—	—	—	—	—	—
2,4,5-Trichlorophenol	350	—	ND	<0.835	—	—	—	—	—	—
2,4,6-Trichlorophenol	40	—	ND	<0.835	—	—	—	—	—	—
Hexachlorobenzene	500	—	ND	<0.835	—	—	—	—	—	—
Pentachlorophenol	200	—	ND	<0.835	—	—	—	—	—	—
3,3'-Dichlorobenzidine	2	—	ND	<0.835	—	—	—	—	—	—

表 6.1-5 某鋼鐵廠土壤調查分析結果彙整表 (續)

檢驗項目	管制標準	S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06	S-07	S-08	S-09
總石油碳氫化合物(C6~C9)	1,000	—	—	—	—	—	—	SN D	SN D	—
總石油碳氫化合物(C10~C40)		—	—	—	—	—	—	SN D	SN D	—

註：紅底表濃度達管制標準以上。SND 表篩選未檢出，其值以篩選限值(100mg/kg)計算。單位：mg/kg

表 6.1-6 某鋼鐵廠地下水調查分析結果彙整表

檢驗項目	管制標準 (mg/L)	W-01	W-02	W-03
		97.03.27	97.03.27	97.03.27
		TOC 0.933 m	TOC 2.262 m	TOC 1.341m
砷	0.5	0.0027	ND	0.0006
鎘	0.05	ND	ND	ND
鉻	0.5	ND	ND	ND
銅	10	ND	ND	ND
鎳	1	0.0037	0.0031	0.0192
鉛	0.5	ND	ND	ND
鋅	50	0.233	0.0502	0.250
1,1-二氯乙烯	0.07	—	ND	ND
1,1-二氯乙烷	8.5	—	ND	ND
1,2-二氯乙烷	0.05	—	ND	ND
1,4-二氯苯	0.75	—	ND	ND
苯	0.05	—	ND	ND
四氯化碳	0.05	—	ND	ND
氯苯	1	—	ND	ND
氯仿	1	—	ND	ND
氯甲烷	0.3	—	ND	ND
順-1,2-二氯乙烯	0.7	—	ND	ND
萘	0.4	—	ND	ND
四氯乙烯	0.05	—	ND	ND
甲苯	10	—	ND	ND
反-1,2-二氯乙烯	1	—	ND	ND
三氯乙烯	0.05	—	ND	ND
氯乙烯	0.02	—	ND	ND

註：紅底表示超過管制標準

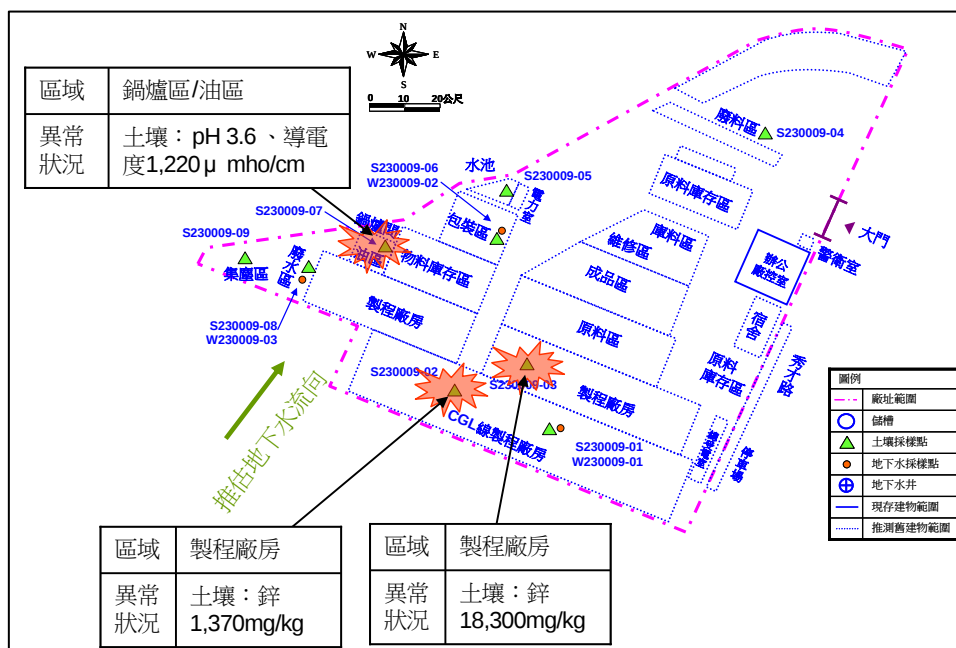


圖 6.1-4 某鋼鐵廠土壤及地下水調查結果

四、後續管理工作建議

依本場址調查結果顯示，土壤污染區域主要分布在原製程廠房，主要為重金屬鋅污染，污染濃度 S-02 為 1,370mg/kg 超過監測標準(1,000mg/kg)、S-03 為 18,300mg/kg，超過土壤污染管制標準(2,000mg/kg)，建議依土污法第七條第五項規定，要求污染行為人、潛在污染責任人、場所使用人、管理人或所有人進行應變必要措施；或依土污法第十二條第二項規定，公告污染點之地號為土壤污染控制場址。

地下水因無發現有明顯的污染情事，建議於土壤重金屬鋅高污染點地下水下游處補充設置一口監測井，以確認地下水有無污染的情事發生。

後續因應方面，建議環保機關針對場址內外進行瞭解，是否民眾在使用地下水進行農田灌溉、漁塭養殖、種植農作物或生活用水，應通知民眾避免使用地下水，以防止污染的擴散或造成身體健康的危害；並責成污染行為人針對場址污染範圍進行調查，以確認污染是否有擴散之場址外，並劃定土壤污染管制區，若有對民眾健康造成風險，應限制居民的活動，避免進入本場址。

6.2 污染範圍調查

某鋼鐵廠經 6.1 節確認污染事實後，延續污染範圍調查工作。在進行污染範圍調查前，必須先深入瞭解場址背景資，接著著手污染調查規劃，確定污染範圍，各階段工作分別說明於后。

一、背景資料確認

(一)環保局相關紀錄

由○○縣環保局資料顯示，○○鋼鐵廠曾於○○年間排放廢污水，造成當地里民污染糾紛，其附近地下水經調查報告顯示有重金屬污染情形。

(二)其他政府機關相關紀錄

1. 地籍資料、土地登記謄本、地籍圖謄本(如附件)
2. 工廠設立資料
3. 災害紀錄

經查詢經濟部技術處委託工研院建置之事故資料庫檢索系統，查詢火災、化災等災害歷史紀錄，○○鋼鐵廠無相關災害紀錄。

4. 地下水、土壤紀錄

經查環保署水質監測資料統計查詢系統之某國小地下水監測站(測站編號 4630，距本廠東北方約 1,900 公尺)，本區域之地下水水位約位於地表下 2.5 至 6.5 公尺，地下水質錳、氨氮等一般項目濃度高於第二類地下水水質監測基準，其餘一般項目及重金屬均屬正常。本區域無土壤相關資料。

(三)環保機關污染調查歷史紀錄

某縣市環保局於某年進行污染調查工作，採樣地點根據高污染潛勢地區進行佈點採樣，其查證結果說明於后。

由本場址調查結果顯示，在土壤方面，原熱浸鍍鋅廠房附近 S-03 點重金屬鋅(18,300mg/kg)超過管制標準(鋅 2,000 mg/kg)；S-02 點重金屬鋅(1,370 mg/kg)超過監測基準(鋅 1,000 mg/kg)，異常區域圖如圖 3-2 所示。

在地下水方面，3 口簡易井地下水重金屬皆未超過管制標準

及監測基準；2 口簡易井 W-02 及 W-03 井檢測 VOCs 及 SVOCs，皆無檢測出。

二、 污染調查規劃

依相關資料蒐集及分析結果，以及某縣市環保局調查結果，針對本場址土壤重金屬污染範圍調查進行採樣及分析規劃，茲說明如后。

- (一) 土壤採樣點將以 10 x 10m 進行虛擬網格劃分，並以間隔方式進行平均佈點，採樣點數量為 12 點，位置如圖 6.2-1。
- (二) 土壤採樣深度以原污染深度○公尺為主，以連續採樣方式進行採樣，並每 50 公分進行 XRF 檢測，依結果取讀值最高者進行分析土壤樣品。
- (三) 場址重金屬污染項目○進行分析，方法依環檢所公告方法執行。
- (四) 預計調查期間約 6 個月。

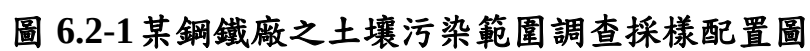
三、 確定污染範圍

本場址已於○年○月○日進場執行污染範圍調查工作，現場調查工作於○年○月○日結束。現場執行調查之採樣點、分析項目、執行單位等皆依污染範圍調查計畫書規劃內容執行。

本場址主要為土壤重金屬○○污染，地下水並無發現明顯異常，故無進行地下水設井、採樣及分析；亦無需建立水文地質概念模式或進行地下水污染模擬。

由污染調查結果分析，污染深度約在地表下○公尺以上的土壤，污染項目為重金屬○○，主要污染範圍與涵蓋面積約○○平方公尺，土壤重金屬○○污染體積估算約為○○○立方公尺。

由污染範圍及濃度分佈分析，污染來源應為熱浸鍍鋅廠房的製程廢液之洩漏所造成，因本場址已停止營運，污染來源已移除，不會再持續污染土壤。



參考文獻

1. Egozy, Y., Adsorption of Cadmium and Cobalt on Montmorillonite as a Function of Solution Composition, Clays and Clay Minerals, Vol. 28, No. 4, 311-318, 1980.
2. Elrashidi, M. A. and O'Connor, G. A., Influence of Solution Composition on Sorption of Zinc by Soils, Soil Science Society of America Journal, 1982.
3. Mattigod, S.V., Sposito, G. and Page, A.L., Factors Affecting the Solubilities of Trace Metals in Soils, 1981.
4. Schultz, E. and A. Joutti, Arsenic Ecotoxicity in Soils, Geological Survey of Finland, Miscellaneous Publications, 2007.
5. Tessier, A., Campbell, P. C. and Bisson, M., Sequential extraction procedure for the speciation of particular trace metals, Analytical Chemistry, Vol. 51, No. 7, pp. 544-551, 1979.
6. USEPA Integrated Risk Information System (IRIS) , <http://www.epa.gov/iris/>
7. USEPA, Partition Coefficients for Metals in Surface Water, Soil, and Waste, EPA/600/R-05/074, 2005.
8. 王一雄、陳尊賢、李達源，土壤資源利用與保育，國立空中大學專書，2002。
9. 田曉伍、任金霞(譯)，化學元素導覽，世潮出版公司，2004。
10. 行政院勞工委員會，危險性工作場所審查暨檢查辦法，行政院勞工委員會 101 年 7 月 13 日勞檢 5 字第 1010150753 號令，2012
11. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染調查作業參考指引總則，EPA-25-III-05B-2015-001，2015
12. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治法，中華民國 99 年 2 月 3 日總統華總一義字第 09900024211 號，2010
13. 行政院環境保護署，土壤及地下水重金屬與無機陰離子污染物污染場址之初步篩試調查、查證及驗證等之作業參考手冊，2011

14. 行政院環境保護署，土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法
15. 行政院環境保護署，土壤污染管制標準，中華民國 100 年 1 月 31 日行政院環境保護署環署土字第 1000008495 號令，2011
16. 行政院環境保護署，水污染防治法，中華民國 104 年 2 月 4 日總統華總一義字第 10400014261 號令，2015
17. 行政院環境保護署，地下水污染管制標準，中華民國 102 年 12 月 18 日行政院環境保護署環署土字第 1020109478 號令，2013
18. 行政院環境保護署，事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準，中華民國 95 年 12 月 14 日行政院環境保護署環署廢字第 0950098458 C 號，2006
19. 行政院環境保護署，空氣品質模式模擬規範，中華民國 104 年 8 月 11 日環署空字第 1040064875 號，2015
20. 行政院環境保護署，應用壓力循環處理系統整治受重金屬及有機物污染之底泥，EPA-97-U1U4-04-002，2009。
21. 行政院環境保護署，環境檢驗所，<http://www.niea.gov.tw/>
22. 行政院環境保護署，環境檢驗所，土壤採樣方法，NIEA S102.63B(中華民國 104 年 2 月 2 日環署檢字第 1040009426 號)，2015。
23. 行政院環境保護署，環境檢驗所，環境採樣規劃設計，2005
24. 吳家誠，台灣地區不同土綱土壤中重金屬總量檢測分析，EPA-91-E3S4-02-04，環境保護署環境檢驗所，2003。
25. 李芳胤、陳士賢，土壤分析實驗手冊，新文京開發出版公司，2007。
26. 李孫榮，土壤中重金屬污染物之宿命與傳輸行為之模式研究及其應用，國科會研究計畫，計畫編號 NSC-88-2211-E-041-003，2008。
27. 林浩潭、陳素文、沈季蓉、林高永，磷肥施用對土壤砷脫附之影響，2008。
28. 勞工委員會北區勞動檢查所，鉛作業危害預防手冊，2003。
29. 劉文堯、劉振宇，含洛克沙生禽畜糞之土壤污染潛勢評析，台灣土壤及地下環境保護協會簡訊，34，3-13，2010。