

土壤背景重金屬濃度調查

賴允傑、何秉宜、劉泰銘

瑞昶科技股份有限公司

余炳盛

國立臺北科技大學材料及資源工程系

摘 要

國內部分區域因自然環境地質因素影響，如陽明山、金瓜石、花東地區等處，土壤中重金屬含量偏高甚至有超過土壤污染管制標準之情形，於地質學上稱此為地球化學異常現象，但因以往土壤調查作業係以人為污染之概念為基礎，鮮少考慮此項重要地質因素，以致於未能充分瞭解重金屬濃度偏高之原因，污染調查者更面臨無法釐清人為污染及自然背景濃度差異之情形。

藉由區域性自然背景地球化學微量元素含量調查作業，污染調查者可瞭解調查區域內自然背景濃度高度異常之土壤來源，與其與人為污染之差異性，並可提供行政單位風險管理決策評估或作為污染改善目標值訂定之參考。本文參考美國環保署所建議之土壤背景重金屬濃度調查作業方式，於某一受背景地質地球化學異常因素影響之調查區域，利用地質調查與土壤性質分析等方式評估建立可代表調查區域之背景場址，據以建立調查區域之土壤背景重金屬濃度參考值。

關鍵字：土壤調查、地質調查、重金屬、背景濃度、地球化學異常

一、前 言

土壤的生成主要受氣候、生物、母質、地形及時間等五大成土因子影響，臺灣位於溫暖多雨的環境，風化作用強烈，但又受地形因素影響，地表侵蝕作用亦強，多數地區土層淺薄或土壤生成化育時間較短，以致土壤中重金屬等微量元素含量深受母岩性質所影響，且有異於其他地區元素含量背景濃度值之情形，於地



質學上稱此為「地球化學異常 (geochemical anomaly)」現象，惟近年國內辦理土壤重金屬污染調查作業時，多以人為污染之概念為基礎，鮮少考慮此項重要地質因素。

臺灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交接處，由於板塊碰撞伴隨著火山活動，熔融的岩漿於噴發後冷卻凝固形成以火成岩為主體之地質構造，受不同地質條件因素影響，火成岩中可能含有相對較高之重金屬等微量元素含量，例如於地底深處高溫高壓的環境下，岩漿與受加熱之地下水（熱水礦液）可溶解較多的金屬離子，當熱水礦液向上湧升至地表後緩慢冷卻，過飽和的金屬離子便會沉澱富集成礦體（一般礦體所含元素之濃度常需達 1%~2% 以上始具開採價值），此即為臺灣北部金瓜石地區金、銅礦床之成因，而礦體周邊風化之土壤中則可發現砷、銅、鉛、汞等其他伴生元素含量偏高之情形（余炳盛，1999）。又如玄武岩或蛇紋岩等基性或超基性火成岩，因含有較多的橄欖石、輝石、角閃石等鐵鎂礦物，鉻、鎳、鈷等微量元素含量亦較高，臺灣東部蛇紋岩分布區所採集之土壤樣品即有發現鉻、鎳等重金屬含量偏高現象（劉滄琴等人，2007；許正一，2011）。

國內歷年所辦理之土壤調查作業，曾於陽明山、關渡平原、金瓜石、花東地區、澎湖等地發現土壤中重金屬濃度疑受區域性自然背景因素影響而有偏高異常之情形，藉由區域性自然背景地球化學微量元素含量調查作業，可輔助我們判定實際之人為污染程度，提供行政單位風險管理決策評估之參考，並可避免誤稱自然背景濃度高度異常之區域受到污染（可能造成隨之而來嚴重的社會經濟或財務危機），必要時，則可依據實際情形修正相關的污染改善目標值（Zhang et al., 2007；Baize, 2010）。

本文參考美國環保署所建議之土壤背景重金屬濃度調查方式，於一受背景地質重金屬濃度影響之區域，依據野外地質調查作業成果，挑選一處與原工廠運作區域土壤生成環境相似之背景場址，進而間接建立該廠區之背景重金屬濃度值。

二、何謂背景濃度

國內目前針對背景濃度或背景場址相關之說明或定義如下：

(一)背景值濃度 (background level) (環保署，2006)：化學物質於自然環境中原來的濃度，而非由場址污染所造成的濃度。部分非自然產生之污染物（如戴

奧辛、多氯聯苯等)因為已於環境中存在且無法被分解,在自然環境中,也會檢測出背景值的存在。

(二)似無污染區(環保署,2011):似無污染區僅使用於採樣計畫規劃時,屬於主觀判定之成果,其操作型定義為:與製程或高污染潛勢區域無關而完全獨立用途之用地區域,例如於地面上未堆置原物料、廢棄物或毒化物、無可視污染,且地上及地下無製程或廢水管線經過之區域,如山林、緩衝綠地、員工宿舍與員工停車場、空地或未利用土地、體育館或活動中心等。

美國環保署及其相關單位對於「背景(background)」一詞普遍採用之定義為:Substances or locations that are not influenced by the releases from a site and are usually described as naturally occurring or anthropogenic:

(一) Naturally occurring—substances present in the environment in forms that have not been influenced by human activity.

(二) Anthropogenic—substances are natural and human-made substances present in the environment as a result of human activities. (USEPA, 2002)

亦即特定物質或地區未受場址運作或排放之污染物影響,可區分為自然背景以及人為來源背景兩部分,部分污染物可能同時含有自然背景及人為來源背景,例如土壤中鉛的來源可能包含土壤母岩中的含鉛礦物及早期汽車所排放之含鉛廢氣。

國內歷年所辦理之各項土壤污染調查計畫,普遍是為了釐清調查區域是否受到污染,調查作業中所規劃之背景採樣點多應用於評估污染程度之參考,採用似無污染區之定義,即若選用之調查區未曾開發使用,且無任何可辨識之污染,則該調查區土壤之隨機採樣檢測結果,即可視為該地區之土壤背景濃度值,因此多規劃於農地灌區相對上游處、工廠上風處、或採集深層土壤樣品等。

然而部分場址因受前述地質化學異常因素影響,調查區域周邊或深層土壤樣品重金屬濃度可能明顯偏高或超過土壤污染管制標準,污染調查者並無法將所調查之結果作為土壤背景濃度之參考,於評估後續行政管理方式或土壤污染改善作業時,將面臨無法確認風險評估基準、無法以土壤污染管制標準作為整治目標值、或不知實際受污染土壤之量體,以致於無法進一步評估所需採用之風險管理方案、土壤污染改善啟動值及目標值、土壤污染整治技術及整治經費之估算。



例如某廠區土壤中銅、砷等重金屬濃度超過土壤污染管制標準，經評估可能與工廠原運作製程有關，建議應辦理後續土壤污染改善作業，然為確認廠區實際之污染深度及可能影響範圍時，卻發現疑受自然背景地質因素影響，於非製程區、廠區外周邊區域及廠區內深層土壤所採集之「背景」土壤樣品銅、砷之濃度均有偏高情形（如表 1），且調查結果之濃度值變異性相當大，亦無法由採樣點相對位置研判其濃度分布趨勢。污染調查評估者對於此項「背景」土壤濃度值之調查結果立刻產生數點疑問，例如原先所調查研判受污染之土壤究竟是否受到污染、如何劃定可能受污染之範圍及訂定污染改善目標，倘若廠區確實受到地質背景因素影響，則背景濃度值為何、又應如何區別人為污染或自然背景重金屬濃度（濃度值是否為單一認定標準）。

依據土壤污染管制標準第二條之規定：「本標準所列土壤中物質濃度，受區域土壤地質條件及環境背景因素影響，經具體科學性數據研判非因外來污染而達本標準所列污染物項目之管制值，得經中央主管機關同意後，不適用本標準。」故可應用地質學或土壤學等科學研究方式，於特定區域辦理野外地質調查瞭解是否有地化異常現象，評估土壤母質之來源以建立土壤與地質環境之相關性，據此建立土壤背景濃度值。

表 1 某廠區土壤銅、砷濃度值

調查區	土壤採樣深度	銅 (mg/kg)			砷 (mg/kg)			樣品數
		平均值	標準差	濃度範圍	平均值	標準差	濃度範圍	
廠區內 A 製程區	地表下 0~30 公分	2,960	5,100	46.5 ~ 18,200	180	190	22.4 ~ 616	20 組
	地表下 1 公尺以下	1,020	2,300	15.8 ~ 8,340	205	299	9.33 ~ 1,010	20 組
廠區內非製程區周界、山林	地表下 0~15 公分	2,600	2,930	828~6,980	123	193	11~411	4 組
	地表下 15~30 公分	2,150	2,290	804~5,560	130	169	9.25 ~ 376	4 組
廠區內 5 處鑽孔	地表下 1~13 公尺	5,290	11,100	18.9 ~ 37,000	11.3	12.9	<5.0 ~ 69.1	30 組
廠區外 4 公里範圍內	地表下 0~30 公分	89.2	90.8	19.6~231	51.7	41.5	8.37 ~ 112	6 組
	地表下 1 公尺以下	126	201	1.34~481	51.6	50.6	6.86 ~ 134	5 組

註：目前環保署訂定之土壤污染管制標準值，銅為 400 mg/kg，砷為 60 mg/kg。

三、背景濃度調查作業方式及流程

並非所有場址均有必要辦理土壤背景濃度調查，例如非調查區域所關切之污染物、調查區域之污染物自然環境中並不存在、或污染物背景濃度值遠低於土壤污染管制標準或整治目標值，皆無調查背景濃度之必要性。以國內相關法令及場址特性而言，辦理背景濃度調查之主要目的可區分如下：

- (一)評估場址是否受到污染：藉由背景濃度之調查可瞭解場址之污染物濃度值是否因區域環境背景因素影響而有異常情形，並依據土壤污染管制標準第二條之規定評估是否適用污染管制標準，或判定是否為污染場址。
- (二)訂定整治目標值：土壤污染整治場址可藉由背景濃度值之調查，評估是否因地質條件因素無法將污染物濃度整治至低於土壤污染管制標準，進而依據土壤及地下水污染整治法第二十四條之規定，訂定合適之整治目標值。
- (三)風險危害性評估：經分析場址之風險危害來源與污染物之背景濃度值相關並具有一定程度之危害影響，故有必要進一步瞭解其濃度含量高低，以利行政單位辦理風險管理方式評估。

美國環保署（USEPA）辦理有害事業廢棄物污染場址（CERCLA 場址）整治工作時，於完成整治作業後，為評估改善後之污染場址濃度是否符合整治目標，及與鄰近代表性背景場址濃度之差異性，常面臨如何選擇合適之背景場址、建立背景濃度值之問題，因而提出背景濃度（background concentration）調查指引（USEPA，1995；USEPA，2002）。此指引主要說明如何訂定背景濃度值，並可運用統計檢定方法區別不同調查區域間濃度分布之差異性，例如可用以評估污染場址改善後與鄰近背景場址之重金屬濃度分布是否有明顯差異，或釐清受自然背景濃度影響之污染場址（如廢礦場等）是否已完成改善作業至區域背景濃度值。

指引中建議之背景濃度調查方式有：

- (一)運作前之基線調查：在場址開始運作前，調查自然背景濃度。
- (二)背景場址（background site）調查：選擇地質條件與場址類似之地區建立背景濃度。

國內目前並未完整建立各區域土壤重金屬背景濃度參考值，早年較具規模系統性之大面積土壤調查作業多以農業生產之觀點，以 0.1N 鹽酸萃取濃度值評估農地土壤中微量元素作物之可利用性，環保單位並沿用此概念於民國 71 年至 86



年辦理全國土壤污染調查，除砷、汞為全量消化濃度外，其他鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅等重金屬濃度值均無法與現行環保法規規範之王水重金屬全量濃度比較。而多數工廠或調查區域於工商業發展時期歷經整地、建廠、營運、關廠等階段，已難以取得運作前之背景濃度，欲還原調查區域原始之土壤狀況及重金屬含量更形困難。因此採用運作前基線調查成果作為背景濃度值之可行性較低。

背景場址係指與調查區域地質特徵類似，且具有相似之生物、物理、及化學特徵，如植被種類、地形、坡向、土層厚度、土壤基本性質等，通常位於調查場址（廠區）周邊河川上游處、地形較高處、或盛行風向之上風處等。美國環保署建議可透過調查與調查區域具相同環境背景之背景場址，以間接方式建立調查區域背景濃度參考值，建議之調查作業工作流程如圖 1，各項工作之內容說明如下。

(一) 建立場址地質概念模式

背景場址因需具備與調查區域環境背景相同之條件，故應先建立場址地質概念模式，於調查作業前儘量取得區域性地質圖、場置性地質資料（如設廠時之地質鑽探資料）、礦區分布位置，並參考地形、氣候、地表水文等資訊，研判調查區域內淺層土壤之沉積環境、母岩種類、及可能受到之地質作用等，另透過野外地質調查作業，確認與瞭解調查區域及周邊之地質環境。

野外地質調查作業需委請資深地質師辦理，以流經調查場址之溪流集水區為調查範圍邊界，利用像片基本圖為底圖進行調查工作。調查作業建議以步行方式沿溪流及道路（小徑）踏勘各溪溝、支流、及各溪溝間之部分稜線，尋找岩層露頭，或是河溝滾石，藉以蒐集各項地質資料，配合 GPS 及地圖定位，於底圖中標示記錄地形及地層特性、各露頭出露地點，並描述各露頭之產狀，記錄重點為礦化作用、火成岩、煤層、酸礦水及礦業活動等。完成後由資深地質師彙整調查結果繪製場址地質圖，標示各種地質特性分布位置（如地層、構造、或礦化作用等），調查作業時亦建議同時採集土壤母岩及河川沉積物樣品，辦理地質學中全岩地球化學分析與微量元素分析，輔以礦物相定性鑑定與顯微鏡觀察，研判地球化學異常現象原因。

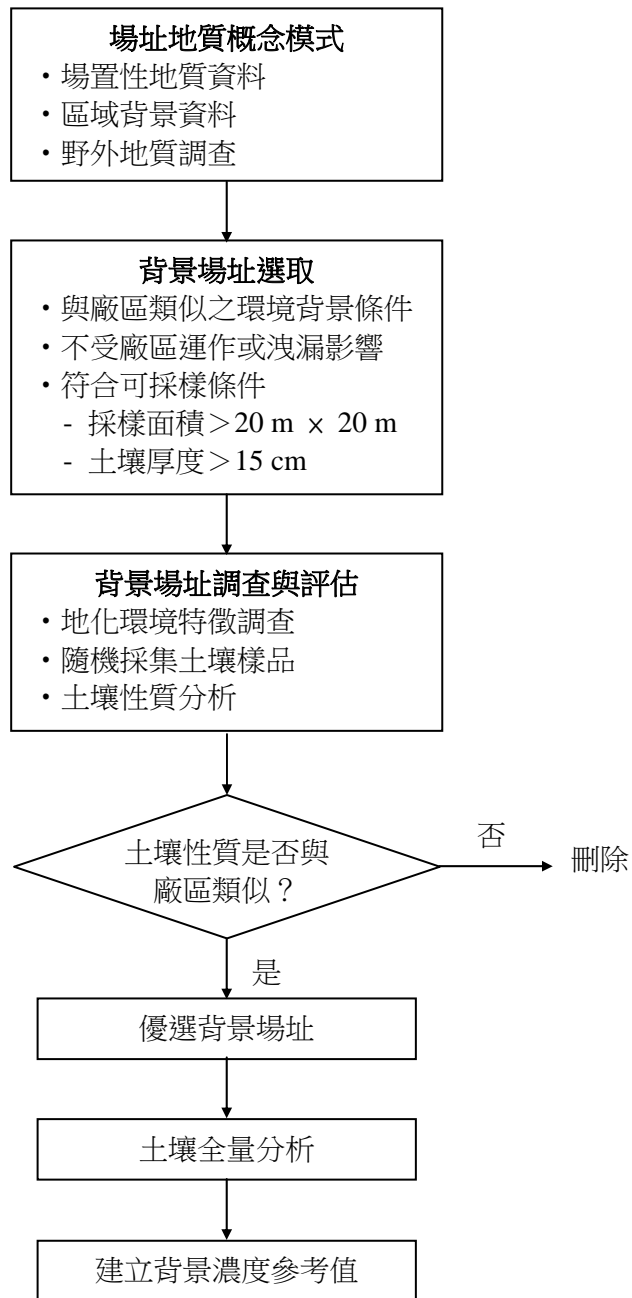


圖 1 土壤背景重金屬濃度參考值建立流程圖



(二)背景場址選取

依據已建立之調查場址地質概念模式，由資深地質師透過野外地質調查作業挑選與調查場址地質概念模式相符之區位，原則如下：

1. 與調查場址之環境背景相同：背景場址需與調查場址具有類似的生物、物理、及化學特徵，就地質觀點而言，即選擇沉積環境相同（土壤來源相同）、及風化作用相仿之區域。
2. 不受調查場址運作影響：背景場址應不受調查場址運作之污染，故通常位於河川上游處、地形較高處、及上風處等。
3. 足夠之調查範圍：由於土壤具異質性與空間變異性，尤其是特殊地質作用（如礦化作用）影響區域更為明顯。一般來說，經統計分析之調查成果較具代表性，故需要較大之調查面積與土壤厚度，以取得足夠且具代表性之土壤樣品。

一般背景場址藉由前述定性之專業評估結果即可決定（USEPA，1995；USEPA，2002），多選在調查場址範圍外之鄰近區域，但若評估符合前述背景場址條件，且為未受人為影響之自然環境，則不受限制。換言之，與調查場址具相同地質概念模式之背景場址，在未受調查場址運作及污染物洩漏影響之前提下，即可代表調查場址，可直接採集土壤樣品檢測分析建立土壤背景濃度值，理想之背景場址重金屬濃度分布應與未受人為影響之調查場址相同。

(三)背景場址調查與評估

完成背景場址挑選工作後，若欲進一步評估該背景場址之土壤性質是否與調查區域相近，可辦理土壤採樣檢測分析比較。首先於調查區域範圍內，挑選一處研判受工廠運作或其他人為活動影響相對較小之區域，作為背景場址比對之參考，稱之為廠區調查場址。此廠區調查場址之土壤生成環境及基本性質原則上應與調查區域內大部分土壤相同，並假設其主要之土壤特性或重金屬濃度分布趨勢與工廠運作前或人為活動影響前相同，但可能有受到輕微且均質性的污染，以致場址之重金屬濃度值較背景場址相對較高。一般可透過土地使用歷史紀錄或歷年航照圖之判釋，挑選非主要製程區，如行政區、停車場，或有完善混凝土鋪面可避免污染物直接影響之區域作為廠區調查場址。

其次於廠區調查場址及所挑選之背景場址，採集土壤樣品分析土壤性質及重金屬含量。各場址（包括廠區調查場址及背景場址）需經由相同之採樣計畫取得土壤樣品，於相同之大小範圍內，規劃 2~5 公尺不同大小之網格間距，再以簡單隨機（simple random）方式選取採樣點。為利統計分析作業，美國俄亥俄州環境保護局建議每一場址或每一調查單位之採樣點數量至少應為 12 組（Ohio EPA，2009），若調查經費許可，建議採集 20~25 組樣品為佳，以縮小統計結果之變異性。

採樣時需視各場址之現場環境狀況，移除易受其他環境因子（如落塵、植體根系、腐植質、礫石等）影響之表層土壤（約 5 公分），再行採集較深層之土壤樣品（如 15 公分以下），並建議於採樣作業時依土壤顏色、質地或外觀差異採集相同之土壤化育層（如統一採集暗褐色表土下方之黃棕色土壤）。反之若欲評估空氣污染之影響，則需採集表層土壤樣品。

此階段背景場址調查與評估作業之土壤性質分析結果，需確認廠區調查場址與背景場址間具有相同或類似之環境背景特徵，應評估調查之項目包含土壤 pH 值、粒徑分布、有機質含量、陽離子交換容量等影響土壤中重金屬含量分布之性質，並可利用 X 光粉末繞射分析法（黏土半定量分析方法），鑑定土壤樣品中黏土礦物組成，以進一步探討場址間土壤化育程度相關性。或分析土壤中微量元素含量，以地球化學之觀點探討土壤與母岩之相關性。

(四)背景場址土壤濃度值建立

經過地質調查、土壤性質分析評估等步驟，調查者已綜合相關資訊挑選一處優選背景場址。為建立具參考價值之背景場址土壤重金屬濃度及土壤性質，建議於此背景場址以簡單隨機（simple random）方式採集 40~60 組土壤樣品以環保署公告方法分析重金屬含量，以避免因地質作用影響程度分佈不均勻、人為採樣作業之誤差，造成分析數據存有相當大之變異性，提高背景濃度參考值分析結果之可信度。

理論上，若背景場址經評估確認並未受到工廠或其他人為因素影響，則所有所採集之土壤樣品，其重金屬濃度值均可視為調查區域合理之重金屬濃度背景值，透過統計分析計算可評估調查區域背景濃度之平均值與標準差、族群母體之濃度分布範圍，以及背景值超過管制標準值之機率百分比。



四、某場址背景重金屬濃度調查案例

某調查區域已執行過多次土壤調查計畫，各計畫對於背景濃度之調查，皆採單點採樣分析之方式進行，規劃之採樣點分佈位置遠近不一，自廠區內周邊山林、周界，甚或場址外數公里處皆有，且採樣深度亦各不同。整體來說，檢測分析結果變異甚大，難以明確指出在自然條件狀況下，廠區之土壤背景濃度值為何。計畫執行團隊依據美國環保署建置之背景濃度調查指引，辦理此調查區域之土壤背景重金屬濃度調查，調查作業方式及成果摘要說明如下。

(一) 建立場址地質概念模式

地質調查作業首先蒐集調查場址既有之地質調查成果，如地質圖、場址鄰近區域礦區分布與礦物種類、地球化學探勘成果等資料，另透過野外地質調查作業，確認與瞭解調查區域及周邊之地質環境概念模式，說明如下：

1. 岩石：區域地質資料顯示調查區域及其上游主要以南港及南莊層之砂岩為主，局部地區有火成岩（安山岩及凝灰岩）及頁岩出露。野外地質調查及岩石採樣分析結果亦相同，但岩石普遍受礦化作用影響。
2. 沉積環境：依地形研判，調查區域所在位置為場址內三條河川之沖積扇，由於場址地形起伏甚大，雨量豐富，加上夏季之颱風侵襲，研判土壤厚度不大，且多為較新鮮之河川沉積物所組成。
3. 礦化作用：此為本場址受到之特殊地質現象，也是造成岩石與土壤重金屬含量較高之主要原因。綜合區域地質資料及地質調查成果，場址及其上游區域已受到鄰近礦區礦化作用之影響，礦化程度與礦區之距離及岩石特性有關，大致上有向礦區外遞減之趨勢。
4. 土壤來源：場址地表土壤依沉積環境研判，主要來源應為上游岩石經風化堆積（河川搬運）後形成。由於場址內河川皆發源於鄰近礦區，經採樣分析場址上游岩石發現重金屬元素異常現象（如銅、砷、鉛等），導致河川沉積物亦含有較高濃度之重金屬元素，這可由河川重礦物調查成果得到證實。

綜合上述調查資料所繪製之場址地質圖如圖 2，場址內岩石以沉積岩為主，一般來說重金屬含量較低，但受礦化作用影響，導致岩石地球化學異常，這是場址及鄰近地區岩石重金屬含量偏高之主要因素。然就沉積環境而言，

場址係由三條河川沖積形成(沉積物來源不同),加上來源區之岩石礦化程度各不相同(重金屬含量不同),可能為場址內土壤重金屬含量變化較大之因素。

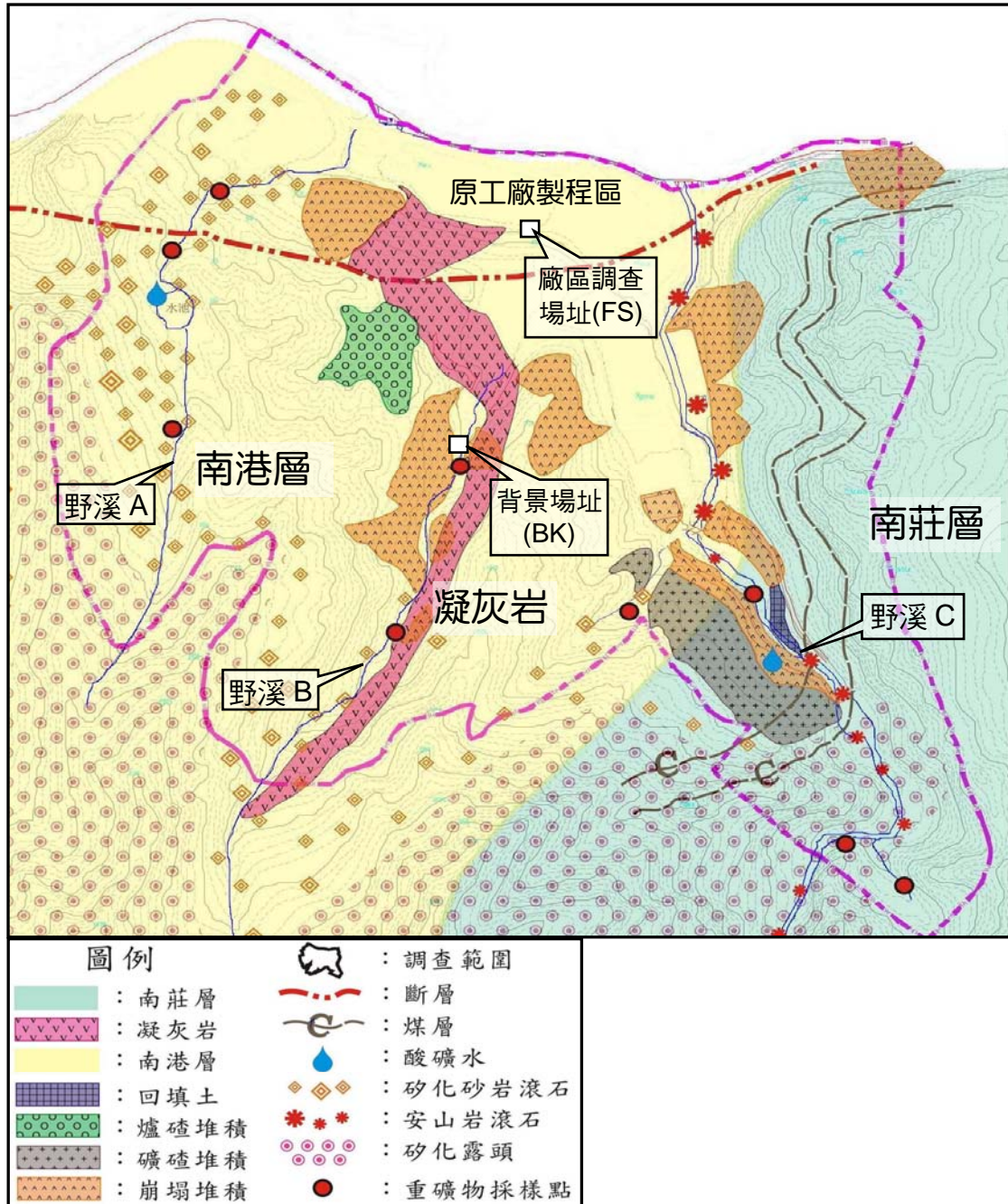


圖 2 場址地質圖



(二)背景場址挑選

依據野外地質調查作業成果所建立之土壤來源概念模式，原工廠製程運作區之土壤主要係由三條溪流沖積形成，場址內之土壤來源與河川上游岩石經風化後所形成之河川沖積物有關，另周邊山坡地皆有沖蝕溝發育，研判於暴雨期間，地表風化所形成之土壤，經沖蝕作用進入調查區。因此於挑選背景場址時，考量土壤之生成來源，合適之背景場址應位於調查區域內溪流沖積物堆積區以及土石崩積處，且符合不受廠區運作或污染物洩漏影響、土壤層厚度與場址範圍面積足夠辦理採樣作業等條件。若所挑選之背景場址土壤來源僅為土石崩落或暴雨沖刷形成，就地質觀點而言應屬局部地質環境現象，相對於主要由沖積環境所形成之廠區調查場址地質環境可能有較大之差異，故可剔除非位處河川沖積環境之區域。

參考所繪製之場址地質圖，原工廠運作製程區及其上游區域以南港層之出露面積較大，故南港層應為調查區域內土壤之主要母岩。調查區域野溪 C 流域位處岩性以白砂岩為主之南莊層，所富含之礦物為石英，經風化後所形成之土壤砂粒含量較高，對重金屬較不具富集作用。因此南莊層所風化之土壤其重金屬富集現象較南港層為低，與廠區概況之差異較大，故背景場址應可排除設置於野溪 C 流域。

調查區域內另兩條野溪流域均位處以南港層為母岩，經河流所沖積形成之沉積環境，且上游之岩石普遍受到礦化作用影響，均符合背景場址應滿足之場址地質概念模式。依據前階段野外地質調查成果，於調查區域中央野溪流域中可發現上游流經之區域有火成岩（玄武岩質凝灰岩）出露，野溪中可發現火成岩類經礦化作用之滾石，或外來之礦化岩塊，搬運距離較短，野溪兩側並有土石崩積現象。河川重礦物中則可發現大量礦化作用之指標礦物（如重晶石等），研判此區域之土壤或沉積物來源易受母岩地球化學異常現象影響，導致重金屬含量有偏高情形，且流域內出露之火成岩質或玄武岩質母岩所風化之土壤，重金屬元素含量通常也較沉積岩質母岩土壤之重金屬含量為高。綜合上述資訊，選取中央野溪流域作為背景場址（BK）。

(三)背景場址調查與評估

由於調查區域受地質作用影響，土壤重金屬背景濃度原本即存有極大之差異，本案例中所挑選之背景場址，其地質概念模式與調查區域相同，就地質觀點而言，背景場址應足以代表調查區域之土壤重金屬背景濃度，但就沉

積環境而言，原廠區之土壤應為調查區域內各種土壤來源混合形成，與背景場址之土壤性質可能仍有差異性，但廠區受整地、建廠等人為干擾後，已無法以廠區內之土壤調查結果作為背景濃度值，故需以所挑選之代表性背景場址，建立廠區土壤背景濃度參考值。而為避免廠區與背景場址兩者之土壤性質有顯著之差異性，調查作業另挑選原廠區內製程區廠房間平坦空地，研判受工廠運作影響較小之區域作為廠區內調查場址（FS），利用地質調查與土壤性質分析結果與所選取之背景場址（BK）相比較，評估背景場址是否具代表性。

廠區調查場址（FS）土壤性質分析結果顯示，土壤外觀呈灰色、灰黑色及棕色，部分土壤樣品外觀呈灰色且質地細緻，應屬凝灰岩風化之土壤樣品，質地自砂土夾礫石至壤土夾礫石不等，礫石含量較高，細粒含量介於 12%~43% 之間，陽離子交換容量為 11~30 meq/100g，有機碳含量偏低介於 0.2%~0.7% 之間。

背景場址（BK）土壤受土石崩積及野溪沖積影響，變異性較大，土壤外觀呈黃棕色，質地為壤質砂土至壤土，河道旁之採樣點礫石含量較高，細粒含量介於 20%~60%，陽離子交換容量介於 9.4~34 meq/100g，有機碳含量介於 0.5%~1.8% 之間。

因調查區域包括南港及南莊等沉積岩層，且有凝灰岩、安山岩等火成岩分佈，多樣化之土壤母岩，再加上溪流湍急，沉積環境較不安定，導致沉積物淘選度較差，都是造成兩處場址土壤變異性較大之可能因素。大體來說，背景場址之土壤性質多落於廠區調查場址之土壤變異範圍之內，場址間之差異較不明顯。

土壤樣品之 XRD 礦物相定性鑑定結果顯示兩處場址之土壤樣品皆發現與熱液礦化作用有關之礦物，包括重晶石、硫砷銅礦或黃銅礦等，前述礦物於岩石及河川沉積物中亦有發現，證實土壤與上游母岩及河川沉積物間具有良好的關連性。熱液礦物為自然生成，其重金屬元素含量較高（如硫砷銅礦），由於土壤中含有熱液礦物，故自然背景亦為土壤中重金屬來源之一。定向片 XRD 分析結果顯示調查區域之黏土礦物主要以高嶺石和伊利石為主，且皆未發現膨脹性黏土礦物（蒙脫石），但僅於 FS 場址與 BK 場址部分土壤樣品中發現含有少量的伊利石-蛭石的混層礦物，就黏土礦物組成而言，兩處土壤相似性較高，初步研判伊利石-蛭石的混層礦物之出現，可能與凝灰岩有關。



綜合相關地質調查與土壤性質分析成果，與土壤重金屬富集作用較為相關之影響因子除礦化作用外，以沉積母岩及火成岩出露等地質條件較為相關，土壤中所含礦物則代表土壤母質來源，故研判 BK 場址為合適之背景場址。

(四) 背景場址土壤濃度值建立

以小尺度而言，調查區域受自然背景影響，各採樣點間土壤重金屬濃度變異甚大，因此若欲以一單一濃度值作為該場址之代表濃度值並不切實際，較好之方式應是以關切物質之濃度分布範圍作為討論標的 (USEPA, 1995)。但以大尺度來看，仍可計算調查場址之平均重金屬濃度，作為調查區域土壤重金屬「平均」濃度之參考。BK 場址經調查評估後判定可作為調查區域之代表性背景場址，於此場址採樣分析之 85 組土壤樣品銅濃度分布範圍介於 12.9~1,940 mg/kg 之間，平均值為 241 mg/kg、標準差為 290 mg/kg；砷濃度範圍分布介於 4.15~48.9 mg/kg，平均值為 14.5 mg/kg、標準差為 8.8 mg/kg。

無論以大尺度或小尺度之觀點，調查區域中土壤背景重金屬濃度均存有明顯之差異，雖「平均」背景濃度低於管制標準，但仍有部分區域之土壤重金屬濃度高於管制標準。就統計觀點而言，計算管制標準對應於背景濃度之百分位數，即可預測本區土壤樣品超過管制標準之機率。經計算，銅之管制標準 (400 mg/kg) 位於背景場址銅濃度分布機率函數之第 86 個百分位數，即有 14% 之機率，調查區域內土壤銅濃度會高於管制標準 (約 7 組樣品有 1 組)，或有 14% 區域之土壤濃度會高於管制標準。

五、結論與建議

土壤背景濃度含量主要受地球化學背景 (geochemical background) 影響，其定義為「原始地球母質中元素之自然豐富度」(Reimann and Garrett, 2005)，因此在辦理土壤背景重金屬濃度調查作業時，唯有透過地質調查作業程序，先行了解土壤母質來源、土壤生成環境，挑選合適之背景場址，進而探討土壤重金屬濃度之可能含量與濃度變異程度，所調查之土壤「背景」重金屬濃度始有其代表性意義。另土壤性質受氣候、生物、母質、地形及時間等成土因子影響，土壤重金屬濃度會有顯著之空間變異性，因此背景值應被視為一濃度範圍，而非一個絕

對值，在討論並應用土壤背景濃度資料時，應以濃度範圍之觀念討論。而此類因自然因素影響所致土壤重金屬濃度偏高異常之區域，對於農作物或環境品質之可能影響，則需進一步研究評估，以作為後續風險評估與行政管理決策之參考。

參考文獻

1. Baize D., 2010, Concentrations of trace elements in soils: The three keys, 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.
2. Ohio Environmental Protection Agency (Ohio EPA), 2009, Technical decision compendium: Use of background for remedial response sites. Division of Environmental Response and Revitalization.
3. Reimann, C., and R.G. Garrett, 2005, Geochemical background - concept and reality. *The Science of the Total Environment*, 350: 12-27.
4. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 1995, *Engineering forum issue paper. Determination of background concentrations of inorganics in soils and sediments at hazardous waste sites*. R. P. Breckenridge and A. B. Crockett. Office of Research and Development, Washington, DC. EPA/540/S-96/500.
5. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2002, Guidance for comparing background and chemical concentrations in soil for CERCLA sites. Office of Research and Development, Washington, DC. EPA /540/R-01/003.
6. Zhang H.B., Y.M. Luo, M.H. Wong, Q.G. Zhao and G.L. Zhang, 2007, Defining the geochemical baseline: a case of Hong Kong soils. *Environmental Geology*, 52(5):843-851.
7. 行政院環境保護署，2006，土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法及撰寫指引。
8. 行政院環境保護署，2011，土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法。
9. 余炳盛，1999，土壤重金屬含量與其地質環境之關係，*大漢學報*，第 13 期，169-184 頁。
10. 余炳盛，2005，陽明山國家公園土壤重金屬含量及地質特性對土壤性質影響之研究，*國家公園學報*，第 15 卷第 2 期，65-87 頁。
11. 許正一，2011，土壤重金屬知多少，*科學發展月刊*，第 468 期，第 54~59 頁。
12. 許正一、蔡衡，2011，蛇紋岩土壤之特性及其重金屬含量偏高問題，*臺灣鑛業*，第 63 卷第 1 期，12-26 頁。
13. 劉滄琴、郭鴻裕、朱馥良、連深，2007，臺灣東部蛇紋岩母質化育土壤地區重金屬特性之初探，*臺灣農業研究*。第 56 卷，第 2 期，65-78 頁。