

# 土壤污染及復育所面臨的問題

中興大學土壤環境科學系

鄒裕民

## 一、前言

工業生產是為了滿足人類生活所須，雖然「綠色工業」在最近幾年已被大眾所重視，它強調製程及用料的改進、回收及再利用，藉以減少廢棄物的產生，但是僅管這些努力，工業活動過程仍然會有副產品(by-product)及不純物質的產生，無法達到真正完全零廢棄物的目標；同樣的農業生產(包括農藝及畜牧業)亦會造成大量的有機廢棄物，或是由農藥的施用衍生有機毒物質的殘留，這些人類活動過程中直接或間接的生成物，若無法或被視為不值得回收再利用的話，它們就被視為廢棄物；此外，假如產品達到它使用的生命週期，最終它也會成為廢棄物質，這些廢棄物最終不是被傾倒於垃圾掩埋場就是進入焚化爐，當然上述的流程是按正常的環保法規進行，對環境的可能危害較低。但是今天，由於考量到廢棄物處理成本逐年增加，縱使一些相當積優的廠商亦會悖逆著良心及對地球的責任，偷偷或任由不肖的廢棄物處理業者，將有毒的物質不加處理的直接排放於自然環境中，造成生態浩劫。

隨著台灣民眾對生活品質的要求愈來愈高，周遭的環境議題已逐漸成為公眾關注的焦點，在人民高度的參與或影響環境政策的制定下，政府及立法機關對產業(農、工業等)界產品的應用、廢棄物的管理及提升可再利用材質的回收等要求也愈來愈嚴格，其目的無非是要以更前瞻性的手法降低危害環境及人體健康物質的產生及其在自然界的傳遞。但是不可避免的是在更嚴格的環境政策及法令制定前，由於廢棄物的排放較為寬鬆或是環保法令的缺乏，這些早期釋放的污染物及場址，已經變成今天環境復育的中心課題。因此，我們在談現代的環境維護的施行，可略分為兩大方向：第一、從產業的製程著手(也就是所謂的綠色製程)，減少有毒生料(raw materials)的應用，改變生產流程，使得產品的產率達到最大而附產品(by product)的產生達到最小，並使其產品易於組裝、拆卸及回收，達到循環利用的最終目的。第

二、發展經濟有效的污染物處理技術，雖然數十年來很多生物(biotic)及非生物性(abiotic)的處理方法已被科學家及工程學家提出，但是這些技術很少兼具“經濟”與“有效”，這原因除了極端複雜的田間環境降低了處理技術的效益外，另一項重要的因素在於發展或應用這些技術的人員，對待處理環境特別是土壤環境的認識不足所導致；也就是說，部份復育技術的發展在應用時未考慮到各類土壤環境的特性，因此在小範圍及單純的實驗室環境下之應用成果常無法擴及大範圍的田間樣區。相反的，盲目的擴大應用不恰當的復育技術，也可能影響或改變該環境的原有生態。因此，過與不及均是造成復育技術應用發展的最大限制。

如前所述，環境議題已成為民眾關注的焦點，民眾的參與或多或少促使復育技術的發展更為溫和，亦即他們希望復育施行時對原有環境的衝擊最小，因此利用現地的生物或材質(包括對環境無害的人造資材)做為污染物處理的方式，漸漸的成為復育技術發展的主流。生物復育對有機污染物(特別是石油類的有機物，主要屬於LNAPL, light nonaqueous phase liquid)的降解效率非常顯注，但是由於生物本身生長條件的要求及污染物毒性的影響，實際應用可能有所限制，且其對含氯的有機分子，如DNAPL (dense nonaqueous phase liquid)，降解的效果不大。土壤環境含有無數的有機及無機天然資材，這些資材與污染物的交互作用(包括吸附、絡合、催化、氧化還原及插入等反應)，對污染物的傳輸及其在環境中的命運有決定性的影響，這些自然資材又以有機分子及粘土礦物在土壤環境中所扮演的角色最為重要。長久以來，土壤有機質被視為死亡之動、植物體經微生物作用所產生不同程度分解的產物，而其又因萃取及溶解反應的差異，人為的區分為腐植酸，黃酸及腐植素，由於土壤有機體對有機污染物的吸附極為重要，以具不同官能基之有機分子、或萃取之有機分體(fraction)對有機污染物的吸附關係做整合研究，可概略描繪出土壤有機質對污染物質交互作用的機制。另一方面，土壤有機質常與土壤無機膠體(即粘土礦物)形成互相緊密的膠結，其中一種特殊的膠結反應為有機分子插入(intercalation)膨脹性的粘土礦物(如蒙特石)，大約在70年前，這種插入反應已被應用在石油裂解(cracking)的催化作用上，雖然之後蒙特石礦物被較熱穩定的沸石(zeolite)所取代，但它開啟了膨脹性粘土礦物在催化科學應用的新紀元。自然界孕育出來的膨脹性粘土礦物，需

由岩石經長時期的物理及化學風化而生成，且絕大多數為帶有電性的粘土礦物，此為低價數的金屬陽離子取代四面體或八面體內的高價陽離子所導致，也就是說，自然界的帶電性粘土礦物均為正電荷缺乏，而具有永久性負電荷；而自然界之鐵鋁氧化物在常見的土壤條件下帶可變性正電荷，因此對環境中陰陽離子的結持而言，形成一個良好的互補系統，但是由於環境中的有機或無機物質的交互影響，此兩類礦物表面或層間的吸附位置可能被修飾(modified)甚或消失，因此它們對污染物的反應可能不如純系統來得明顯有效。

為滿足人類生活所須，大量的化學物質被合成或純化，使用、儲存及運送這些物質的同時，往往產生氣、液或固體形式的廢棄物經由各種可能的溢漏方式，影響及污染土壤環境。廢棄物概分為固體及非固體兩種，固體廢棄物包括農業、工業、礦場及都市人類活動所產生的異相性的固態廢棄物質，非固體廢棄物主要分為兩大部份：有機及無機廢棄物，無機廢棄物主要由重金屬物質所組成，當然也包括了非金屬，如氰化物(cyanide)、石棉(asbestos)及放射性廢棄物；有機廢棄物則含概天然的石油及相關的鍊解產品(refining products)，人工合成的有機溶劑或表面活化劑，如多氯聯苯(PCB)及工業產製過程中的不純物或低溫燃燒塑膠所產生的戴奧辛，其種類及變異性遠比無機廢棄物複雜。廢棄物影響環境及潛在與人類接觸的主要因子在於它們的傳播方式，也就是說這些物質是由那一種方式進入生物圈，它們有可能直接散失於空氣中，經由放流管的排放或地表面徑流的方式進入水體及土體，當然也可能由地下儲油設施的洩露或掩埋場地下設施的裂縫直接接觸地下土層及地下水。大氣中的污染物會因重力或降雨進入水體及土壤中，水中的污染物也可能因沉澱作用成為沉積物的一部份，或當水體下降、蒸發而成為土壤組成份，同樣的土壤中的污染物亦可由揮發或雨水滲入將其帶至大氣或水體(地下或地表水)中。由於污染物的循環的確發生在週遭的環境，因此對某一污染源而言，我們很難以它目前所在的位置，明確的定義其屬於土壤、水或空氣的污染範疇，但是針對單一污染物在單一或兩種基質間作用的探討，有助於我們瞭解污染物的循環過程，研究最可能降解或固定它們的生物或理化條件。

## 二、台灣農地污染概況

永續發展是我國近年來所推展的一大施政與教育方針，目的除了與國際上對環保事物接軌，盡一份地球人的責任，改善日益惡化的地球環境外，最重要而切身的問題之一則是如何達到農業的永續經營與管理。發展永續農業經營攸關台灣農民長久久的生計，從戰略意義而言也與我國自己自足的農業政策相符，但是縱觀今天台灣重工輕農的環境下，不僅農業人口大幅下滑，更重要的是在工業發展中，農地常因人為無意或刻意的傾倒廢棄物而受到污染。我國土壤污染法規定義土壤污染為：「土壤因物質、生物或能量之介入，致變更品質，有影響其正常用途或危害國民健康及生活環境之虞者」，因此任何物質加諸於土壤中，達到土壤污染認定標準者，皆視為土壤污染物質。根據環保單位在民國七十一年開始的「台灣地區土壤污染防治概況調查」，全台灣 116 萬餘公頃農田土壤，砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅等八種重金屬任一種達含量偏高的四級（總共區分為五級，見下表一），疑似受污染的農地面積高達 30 餘萬公頃，佔總面積的 25.8%。雖然自民國七十五年進行土壤細密調查發現，台灣農田共計約5萬公頃為土壤污染分級四級以上的區域，較第一次概括調查少了很多，但是不可諱言，土壤污染範圍有持續擴大的趨勢，其中又以台中及彰化為台灣農地受重金屬污染最嚴重地區。

表一、台灣地區土壤重金屬背景濃度與等級區分表

單位：mg/Kg

重金屬項目	第一級	第二級	第三級 背景值	第四級 觀察值	第五級	
					監測值	農地優先 整治值
1.As(砷)		表土<4 裡土<4	4-9 4-15	10-60 16-60	>60 >60	>60 >60
2.Cd(鎘)		<0.05	0.05-0.39	0.40-10*	>10	>10*
3.Cr(鉻)		<0.10	0.10-10	11-16	>16	>40

4.Cu(銅)	<1	1-11	12-20	21-100	>100	>180
5.Hg(汞)		<0.10	0.10-0.39	0.40-20*	>20	>20*
6.Ni(鎳)		<2	2-10	11-100	>100	>200
7.Pb(鉛)		<1	1-15	16-120	>120	>200
8.Zn(鋅)	<1.5	1.5-10	11-25	26-80	>80	>300

註：一、As及Hg為全量，Cd、Cr、Cu、Ni、Pb及Zn為0.1N鹽酸抽出量；重金屬含量以三位有效數字表示為原則。

二、「\*」栽種稻米之農地土壤，其鎘與汞含量大於1mg/kg時，應比照第五級地區，進行監測與整治事宜。

表一、土壤污染分級說明(續)

等級	說明
第一級	土壤中缺乏銅、鋅等農作物生長所需元素，尚無重金屬污染問題。
第二級	土壤重金屬含量低於環境背景值，尚無重金屬污染問題。
第三級(背景值)	係大部份土壤重金屬含量之正常範圍，為環境背景值。
第四級(觀察值)	一、除農地土壤之鎘與汞應考量對稻米之影響外，應確認重金屬之污染來源，並加強污染源之調查與管制。 二、栽種稻米之農地土壤，其鎘與汞含量大於1mg/kg時，應比照第五級地區，列為土壤污染防治重點地區，優先進行監測與整治事宜。
第五級	監測值 一、土壤中有外來重金屬介入，應列為土壤污染防治重點地區。 二、本地區應加強污染源稽查管制、污染物移除並進行土壤定期監測，以遏止污染惡化並避免污染影響。 三、本地區如有環境特殊需要，得辦理土壤污染整治事宜。
	農地優先整治值 一、土壤重金屬含量列為此範圍之農地，應進行監測值範圍所為之管制與監測工作。 二、本地區應依環境需要與農民意願，優先辦理土壤污染整治事宜。

資料來源：土壤及地下水污染整治網 ([http://ww2.epa.gov.tw/soilgw/page01/page01\\_00.asp](http://ww2.epa.gov.tw/soilgw/page01/page01_00.asp))

### 三、台灣地區土壤污染源

現今世界上所知的有毒污染物質，絕大部份是由人類活動所造成，這些污染物質被釋放後經由空氣及水做為主要的傳遞媒介，擴大其分佈的範圍，而污染物質則經由污染傳遞媒介帶進入地表的土壤。過去的思維認為土壤具有極大的緩衝淨化能力，物質進入土壤後，可藉由生物及非生物的方式去降解或固定污染物質，但是科學的進步與大量污染源集中濃縮的結果，往往導致土壤生物無法分解這些工業產物及超過土壤負荷能力，於是不僅土壤的農業生產品質降低，土壤也成為人類活動範圍內，一顆引爆環境問題的炸藥，台灣地區自民國七十二年，即先後發生農地遭受重金屬污染而導致休耕的事件，這類事件相信在環保署全省土壤污染調查後，一些隱性的污染場址一定會一一顯現，這將使得土壤污染問題更加嚴重。

土壤污染物質可概分為無機及有機污染物質，而污染源則含概了農業及畜牧廢棄物、都市廢棄物及污水、事業廢棄物(水)及污泥、酸性沉降物、落塵等。農業及畜牧廢棄物最常見的來源是大量的農藥使用及豬糞尿的直接排入土中，這些物質不僅會造成殘留危害，同時會大大的影響土壤中生物的活性與作物生長；台灣地區除了合法的垃圾掩埋場及焚化場，約有29.2%的廢棄物任意傾倒，露天燃燒或直接填埋至河川窪地，這些都市廢棄物及其所衍生的污水常造成河川及灌溉渠的污染，間接因農用取水而進入土壤；由於台灣地狹人稠，再加上土地使用規劃沒有落實，工廠與農業用地常彼鄰而處，工廠廢水若無處理廢水設備，直接將其排放至河川或灌溉渠道，則農民在取用水源時必會將污染物質帶入土壤，最近彰化地區鎘米事件即是此類污染的冰山一角。隨著廢棄物清理法於88年7月的修訂，廢棄物的清運及處理、處置勢必加劇工業界的負擔，尤其是工業製成或廢水處理所排放的污泥，這些污泥由於含有高量的水分，不僅造成清運成本的增加，更因部份污泥內含有毒物質，處理及其再利用均受到限制。現今工業上污泥的處理強調污泥的脫水減量，物理化學的濃縮及生物消化，污泥再用性的研究較為缺乏，部份的再用性研究以製造肥料為考量，但是這些研究往往缺乏污泥內容物對土壤永續利用影響的探討，也就是說

濃縮減量的污泥(如豬糞尿污泥)的長期施用，極可能造成土壤重金屬物質的累積。酸性沉降物及落塵對土壤的影響主要來自工廠及運輸工具的排放廢氣，當這些有害氣體沉降後，其所衍生的酸雨及鉛化合物，對土壤均有不利的影響。其次，研究顯示一些落塵的沉降，亦會將數千公里外的輻射體帶入土壤中。

#### 四、土壤復育面臨的問題

重金屬污染問題廣為社會大眾所關切，但是一般民眾被給予的重金屬污染訊息常僅局限於鎘、銅或鋅等陽離子型態的金屬離子，對陰離子型態如鉻及砷的金屬污染往往被忽略，再加上他們經常被基礎的化學觀念所誤導，認為這些金屬會因吸附或沉澱作用而累積在土壤的表面，在土壤剖面的移動極低，因此祇要針對表土作污染物的減量，減少植物根的吸收，藉以杜絕其進入人體食物鏈的循環即可，殊不知陰離子型態的金屬污染更較陽離子型態的污染危險，理由很簡單，一些對民眾直接且迫切的危害，如空氣及表面水的污染，一般人可以視覺及嗅覺得知，所以不用任何專業常識即可為大眾注意與圖思預防，但是土壤的污染問題則須專業人士的分析才可，若這些所謂的專業人士又不知土壤的基本性質，僅針對土壤表面的金屬含量做分析研究，難免會導致資料的不完整而誤導土壤復育的施行作為。舉一簡單的例子，金屬陰離子在一般酸性土壤移動性不高，因此其在土壤表面含量較高，但是對鹼性土壤而言，這些金屬陰離子具有高的移動性，所以其在土壤剖面的遷移極快，極易造成地下水的污染，若不思及各類金屬特殊的理化性質及土壤環境，則這類金屬的污染問題有可能被忽視，再加上大量地下水的抽取利用，這些金屬進入人類的食物鏈中絕非不可能。

以往對重金屬污染研究經常局限於調查這些重金屬在土壤的分佈，復育工作由於牽涉到時間金錢的龐大支出，往往土壤的復育變得滯礙難行，於是污染的土壤成為台灣幾十年來除不去的痛，農民苦無機會繼續耕種以維持生計，政府更因持續擴大的補貼受污染土壤地上物的收購及追蹤，浪費寶貴的政府資源，更重要的是可耕作農地的持續萎縮，造成台灣農業發展的隱憂，違背農業永續經營的宗旨。雖然

土壤復育技術已被開發應用(包含物化處理，工程技術法及生物處理)，但部份以快，省時的考量去處理土壤污染問題，將大量的酸、鹼施入土壤，電熔處理或將土壤予以永久的固定化，使得整治後的土壤變得不適合農耕使用，試問有多少寸土寸金的台灣農地可這樣的消耗，有鑑於此，發展出一有效且對土壤環境影響最小的土壤復育方法乃土壤學家應做且必須要做的事。目前在台灣一千餘公頃的疑似重金屬污染的土地中，扣除銅及鋅外(銅與鋅原本就是人體應攝取礦物質之一，且目前也沒有其危害人體健康資料)，約有319公頃的重金屬嚴重污染土地，環保署於90年發包由北中南三地業者鎖定這319公頃土地進行更細部的調查(在每一公頃土地採樣三十至六十個土壤樣本)，確定污染物的種類及範圍，立即劃定為管制污染場址及公告地號，並於去年開始陸續由各地政府公開招標，進行後續整治與追查污染工作。而土壤污染改善方式，主要採土壤翻轉稀釋及酸洗二法，針對污染範圍較大但毒性較不明顯之重金屬鎳、銅、鉻、鋅採用翻轉土層稀釋法。翻轉土層稀釋法是將受重金屬污染之農地，以挖土機或耕耘機作垂直及水平之均勻混合，利用土壤的稀釋作用降低土壤中重金屬之濃度至安全範圍以下，或是利用上下翻轉法將受污染的上層土壤與未受污染之下層土壤互換，以恢復農地之利用性(圖一)。





圖一、以翻轉稀釋法處理重金屬污染土壤(由土壤系黃正恆教授提供)

此法在處理未含鎘或污染程度較低的農地上，整體效益比較高。酸洗法乃採強酸將污染土壤中的重金屬予以溶出，但污染土壤經過強酸浸泡數小時，需要大量清水沖掉強酸和化學作用產生的氯離子，通常用水量是酸液的十五倍，龐大的廢水除了將造成二次污染，酸洗法殘留氯離子還會影響土質，導致土壤鬆軟，容易下陷，降低地力，故絕大多數土壤專家均對此一方法的施行抱持懷疑及反對的態度。以農業的角度來看，植物復育(phytoremediation)(利用植物的生長由根吸收或固定土壤中的重金屬)應是對農地的衝擊最小的方式之一，但是其缺點在於耗時及植物本身的生理反應，成效不佳(例如，研究顯示，大部份的土壤重金屬不能被植物的根吸收及轉移至地上部)。最近，科學家更利用基改的方式，例如利用病毒基因轉植入植物體內，使其可製造特殊蛋白質，來幫助重金屬在植體內的運輸，但是這研究仍在實驗階段，相信在不久的將來，應可提供我們以非工程的方式，解決部份土壤重金屬污染的問題。

我個人認為，未來土壤污染的課題，應會由無機重金屬的部份轉移至有機的農藥、石油產品及溶劑的調查及處理研究上，理由有二：(1)人類大量製造及使用有機產品，尤其是合成難以分解的聚合分子，這些物質已經慢慢在土壤中累積，且土壤微生物無法將其分解移除；(2)相當多的有機分子在土壤的移動性高，其會在土壤剖面內遷移，污染深層土壤或地下水，這使得處理污染的土壤更加困難，桃園RCA廠址的整治失敗即為一明顯的例子。過去科學界對土壤有機污染物的處理方式，除了以現地(in-situ)微生物降解及注入空氣以增加土壤孔隙氣體交換，增強揮發性有機分子的擴散達到有機分子的稀釋外，最常用的方式為抽取與處理(pump and treat)法，也就是說鑿設數個抽出井(extraction well)及注射井(injection well)，將地層中的有機物質予以抽出，同時將抽出的水溶液(經處理或未處理，依有機分子的濃度及現地法規而定)再注射於地層內，使造成水力梯度，加速污染物的移動及抽取。隨著科學家對地層土壤及污染物特性的逐漸瞭解，他們發現這種方法有兩個主要的缺點及限制：第一個缺點在於此清除復育的方式會受到土壤不均一性、污染物比重及黏性

的影響，使得一些殘留(residue)的有機分子無法有效的清除，這自由的殘留體(free-residue)反而成為日後地下水污染的源頭。第二個缺點則為此種處理常產生大量含溶解有機分子的水溶液，因此額外的廢水處理設備必須設置，以清除遭受污染的地下水源。含有機之廢水處理通常分為物理(如粗篩、浮上分離及自然沉澱等)、化學(如氧化還原法及活性碳吸附等)及生物處理(活性污泥及消化法等)，物理性的處理僅對粗大或膠體浮游有機物質有顯注的效果；氧化還原及活性碳雖可移除溶解性有機物質，但是通常需加入化學試劑，增加處理成本及有機廢液系統物種的複雜性；而若以吸附的方式固定有機分子，其最終仍須予以脫附及再處理；雖然生物處理通常可達到很好的有機分子降解的效果，但是不可諱言，其反應過程生質量的增加所導致大量污泥的產生，往往造成後續處理的困難，同時生物處理經常無法百分之百的將有機物質予以去除，更因部份有機分子對微生物的高毒性，大大影響它的施用成果。有鑑於此，若能發展出一套方法，去取代現行吸附或化學添加降低溶解有機分子的方法，同時能搭配生物處理技術，相信對一些有機分子，特別是毒性的有機分子的降解上必有相當的貢獻。

微生物不論是在廢水或是有機物污染土壤現地處理均是非常有效及便宜的復育方式，但是一些污染源及污染場址的不均一性(heterogeneous)常減低了它的效果，其他的復育技術也多多少少受限於這不均一性，因此至今沒有一個復育的方式可全盤(universal)適用於世界各地污染場址，滿足當地政府或民間對環保的嚴格要求。不像無機污染源，有機污染源的移動性高，雖然部份的有機分子可分配(partition)於膠體表面，但若污染源持續釋放，膠體表面無法負荷，則其常形成一疏水性的流體，於地下水面或不透水層表面，隨地下水於地底遷移，部份移動性高的有機污染物若再搭配通透性高的含水層，此有機污染物甚至可在地層中移動向下達50呎及側向達400呎之多，這廣範圍及深層的污染必須搭配工程的做為(如阻水及集水設施)，考量大面積的同時施為才可能限制有機污染物的繼續擴散，及消滅它在地層中的濃度，這種廣範疇的研究當然無法在短時間及有限經費下完成。

## 五、結語

土壤是提供農業生產，維繫人類生存所不可或缺之材質，它就像是龐大的生命體，我們不斷的從其中吸收及利用這有機體的組成，使得人類得以繼續成長及孕育下一代，它也像母體對於嬰兒般可吸納人類所排放的廢棄物質，但是，我們若不以對等的方式回饋及保持它永續的生命，則其必會慢慢的枯竭死亡。土壤從數千年前有人類生存的紀錄以來，就默默的奉獻，它不像空氣也不像水體，稍有些許的逆境即顯病態，由於土壤這種高緩衝(buffer)能力，使得絕大多數的人們有著錯誤的觀念，總覺得土壤可無限制的接受及處理人類所不要的物質，也由於土壤具有「忍痛」的特殊性質，使得人類總是關注在「愛哭」、「愛叫」的空氣及水體上，忽視及未給予土壤應有的照護，因此每當土壤顯現病症，其往往是非常嚴重的問題，使得人們束手無策，有鑑於此，做為生產的農業土壤，人們更應設置具有預警功能的措施，及早防止土壤品質的惡化。

土壤是由岩石經數千數萬年的時間慢慢的風化(由物理、化學及生物力分解破壞岩體)生成，它的珍貴不言可喻，身為研究土壤科學的一份子，誠懇的希望每個人都能重視及愛護它，也期待不論是那一背景出身，從事農地土壤工作的科學家及政策擬定者，能夠以「永續土壤」的觀點，仁慈及溫柔的對待我們賴以生存的土壤。土壤是由無機及有機體所組成，土壤一旦受到外來物質的影響，這土壤中為數眾多的無機與有機物必會與其做不同程度的交互作用，產生極為複雜的關係，加深我們從土壤環境中移除這外來物的困難，因此，土壤問題的解決，真的很難兼具效率而不損害土壤本身，以現今科學的限制，惟有加強土壤污染的防治才是根本解決土壤問題的不二法門。