

如何取得代表性土壤樣品？

葛政恆

一、前言

台灣地區近 30 年來的工業發展迅速，雖然造就了今日富裕的生活環境，然而以往的土地利用規劃、管理及地面水體之保護卻不夠周延完善，使得農業地區夾雜許多工廠與工業區，加上農田灌溉系統與工業廢水排放系統未實施灌排分離，因此造成許多地區的農田導引受工業廢水污染的水源進行灌溉，進而產生土壤污染的情形。台灣近 90 萬公頃的農地，主要的土地利用型態為種植水稻，必須使用大量的灌溉水，因此容易導致農地中重金屬的累積，而造成部份農地土壤遭受重金屬污染。

政府相關單位有鑒於土壤為不可再生之資源，且農地重金屬污染易因作物之生物累積作用，而生產出含高濃度重金屬的作物(如鎊米)，繼而危害食用者的人體健康，因此基於農地保育、永續利用及維護國人健康，政府從民國 71 年起陸續推動農地土壤重金屬含量之大樣區(100 公頃)及中樣區(25 公頃)調查，並於 81 年至 88 年間各縣市環保局依灌溉渠道分佈狀況，進行 1 公頃網格之細密調查。

二、歷年來台灣農田的土壤採樣方式

過去歷年來農田土壤的採樣方式，可以依照面積大小區分成三種採樣方式，(1)、25 公頃的採樣方式是於單位面積內採集 20 點土壤混樣，佈點方式係以長方形系統網格選取採樣點；(2)、1 公頃的採樣方式是在單位面積內採集 10 點土壤混樣，佈點方式係以正方形系統網格選擇 9 點土樣，並依照採樣者主觀判斷在採樣範圍內選擇一個入水口採集 1 點土樣，而後與其它 9 個採樣點混成一個樣品，無論是 1 或 25 公頃的採樣點，均採集表土(0~15 公分)及裡土(15~30 公分)。(3)、隨著民國 89 年 02 月 02 日公告土壤及地下水污染整治法、施行細則，土壤污染管制標準，土壤採樣與分析方法等先後公告施行，行政院環境保護署於 91 年針對各縣市所提報屬於第五級重金屬污染之虞(含鎘、汞大於 1mg/Kg) 農地，實施「農地重金屬污染調查及場址列管計畫」進行全省 319 公頃農地污染調查及採樣分析工作，採樣面積以地號為單位，依照採樣人員之主觀判斷，於近入水口處之採取 5 點表土(0~15 公分)土壤混樣，而後依據分析結果，完成每一筆地號農地之土壤重金屬含量清冊，並且針對檢測結果超過土壤污染管制標準之農地進行列管公告事宜。

回顧歷年來的農田土壤採樣方式，大面積農田土壤(25 公頃面積或以上)的採樣方式是以系統網格佈點之混樣方式，將採樣

點平均分配在採樣面積上，以求得該面積內土壤重金屬的平均含量；而 1 公頃面積的採樣方式則是將系統網格與主觀判斷結合的混樣方式；以地號為單位的採樣方式則是主觀判斷採樣設計，雖然仍然採取 5 點混樣，然而各採樣點間的距離只有 5 公尺，因此難以用”混樣”來定義本階段的樣品取樣方式。

三、土壤採樣設計的種類及優缺點

代表性土壤樣品是實驗分析結果與實際環境品質或受污染區的對應者，可以確認所採集的樣品是否能在一定的時間及區域內，反應出可疑污染樣區的污染濃度，並說明可疑污染地污染物種類及濃度的變異範圍，而污染物種類及濃度的變異，代表性樣品數值與最後做成之決定同等重要，如果樣品不具代表性，即使符合其他品質目標如正確性(accuracy)、精確性(precision)、完整性(completeness)或可比較性(comparability)，則都沒有太大意義，而代表性樣品的選擇，首先取決於採樣設計的規劃，而採樣設計的最佳規劃，則視計畫目標與目的而定。因此針對一個污染場址從污染概況調查、污染範圍界定、及污染改善驗證的各個主要階段，均必須選擇最佳的採樣規劃，以能在有限的經費下，獲取最有效及最有意義的調查數據。

採樣設計可區分成機率採樣及判斷採樣設計兩種。機率採樣

是應用採樣理論，以隨機方式採集土壤樣品，而族群中的每個地點被採得的機會有一定的機率，當使用機率採樣時，可以由樣品單位的數值推論目標族群的情況。在機率採樣中，可以利用統計方法而得到樣品族群定量的結論，例如在估計變數中(如平均值)，可以在 95%信賴區間下說明所得的參數，當比較一臨界值(污染改善後驗證濃度)時，也可以在信賴區間下說明分析數值是否超過或低於該臨界值。判斷性的設計採樣設計是在熟練專家知識或者專業的判斷的基礎所行之採樣的選擇，兩者之優缺點比較如表一所示。

表一、機率性與主觀判斷採樣設計之比較

	機率採樣 Probability-based	判斷採樣 Judgmental
優點	可提供推估之不確定性 在信賴區間內具重現性 可作統計性結果推論 可設定決策誤差準則	較經濟與具時效性 易於執行
缺點	採樣佈點為位置不易決定 須有完整之最佳化設計概念	依靠專業知識 判斷之精確性無法評估 依靠個人之判斷去詮釋資料與目標

		之相關
--	--	-----

土壤採樣設計的選擇十分靈活，首先必須考慮採樣目的為何？而後再考量採樣樣區特性與專業人員、經費及時間等限制因子，最後選擇出最適合的土壤採樣設計，以下針對七種採樣設計的優缺點加以探討：

(一)、主觀判斷採樣(Judgmental Sampling)

主觀判斷採樣則是藉由以往資料、肉眼判斷及專業知識，判斷在何處採集樣品及採集多少個樣品。在判斷採樣中，除非是以非常專業之判斷，否則無法從目標族群中得到任何結論。判斷採樣之有效性與研究目的、大小及範圍與專業判斷的有效程度有關，當使用判斷採樣時，並無法得到定量的信賴區間，因為判斷採樣樣品單位的選擇(如採樣數目及位置)是依據調查樣區的特徵及專業判斷而決定，如圖一所示。其與機率採樣不同，因為不是基於統計基礎的理論，因此由目標族群所得的結論會受到限制，而且只與專業判斷的可靠性有關，然而判斷採樣可和其他採樣設計一起使用，以達到對可疑樣區是否受到污染的有效決定。



圖一、主觀判斷於兩處入水口採集樣品。

(二)、簡單隨機採樣(Simple Random Sampling)

在簡單隨機採樣中，每一個樣品之採樣位置與所有其他採樣點位置是無關且不受影響的，個別單位或地點可以利用亂數表來選擇，而所有採樣單位或地點被選擇到的機率都相同。此方法相當容易了解，而且決定所需採集樣品數目的公式很明確，簡單隨機採樣也可做為其他採樣設計之效率及花費上的比較指標。如果族群相當小且均質時，簡單隨機採樣相當適合，而且簡單隨機採樣也可以和其他採樣設計一起使用。除非樣品數少於 20 個，否則簡單隨機採樣的主要好處，是可以防止所選擇樣品不具代表性所產生的偏誤 (bias)，另外選擇簡單隨機採樣的步驟很簡單，其佈點方式如圖二所示。



圖二、簡單逢機於樣區採集 20 個樣品。

逢機採樣的主要優點有：

- (1)對於平均值、比例及變異具有統計上的無偏誤估算；
- (2)因為大多的統計分析均採用簡單逢機採樣，所以數值的統計分析方法很直接；及
- (3)所需樣品數目的計算及數值統計分析很明確。

然而逢機採樣設計也有其缺點：

- (1)因為所有的樣品被選擇的機會相同，採樣點可能在空間或時間上會聚集在一起，但此限制因子可以利用多採及一些樣品來稍微克服，但仍為一限制因子；及

(2)簡單逢機採樣忽視所有的先前資訊或專業知識，而先前資訊通常可以用來發展出比簡單逢機採樣更有效率的機率採樣設計，即其他採樣設計可能只需要較少的樣品數，而可以得到與簡單逢機採樣相同的精確度。

(三)、分區逢機採樣(Stratified Random Sampling)

分區隨機採樣係根據以前的資訊及先前的篩選資料(screening data)，將一個採樣區區分成幾個亞區，以控制來自於土壤、地點及地理特性等之變異，將可疑污染地區分成幾個不同的均質區域，如此可以增加對污染物濃度估算的精確度。分區的原理可以根據採樣深度、污染物濃度、污染源面積來劃定，而後在小樣區內進行隨機採樣方式的佈點採樣。雖然分區隨機採樣限制了污染地的劃分，但由於仍允許在小樣區內進行隨機採樣，因此也可以用統計方式評估所得的數值，也可以分別說明各亞區內的污染情形。

分層採樣設計的最大優點是，比逢機採樣設計可以使資源更有效率的分配，因此可以節省較多的經費，但是分區採樣在田間並不容易執行，而且統計分析也較為困難。分配樣區採樣數目的原則，可以依比例位置(proportional allocation)將樣品分配到各個亞樣區，則至少會得到比簡單逢機採樣設計較高的精確性，但是如果採用適當位置(optimal allocation)分配樣品到各亞樣區，而亞樣區中的變數估計沒有接近實際值時，所得的估計精確水準反而會比簡單逢機設計為差，所以分區採樣需要可靠的先前資訊，才能有效且適當的進行分區與分配樣品數目(圖三)，其精確度的獲得或採樣分析費用的降低，主要取決於分區時所使用與待測參數相關第二參數的相關性。



圖三、依照樣區距離灌溉溝渠遠近區分成 A 及 B 兩區，主觀判斷 A 區可能受污染之機率較高，以三角網格設計分別在 A 及 B 兩區採集不同數目的樣品。

(四)、系統及網格採樣(Systematic and grid sampling)

系統網格採樣係將採樣區以小方格或三角形網格劃分，而固定在格線的交點上或在網格面積內隨機採集樣品。系統網格內採樣點的距離，係由採樣區的面積及樣品數目所決定，網格起始點(start point)座標及位向，則是用隨機方式決定。由起始點開始，其餘的樣品則是規則的依據一定間格面積(網格)或時間(系統)來採樣，進而完成整個採樣區內網格點的分佈，而系統網格採樣包括方形、長方形、三角形或放射狀，三角形系統網格採樣設計如圖四所示。



圖四、三角網格方式於樣區採集 20 個樣品。

系統網格採樣設計在田間的使用很實際且方便，通常可以提供較好的精確度，例如較小的信賴區間及族群估計標準偏差值，而且比逢機採樣設計更能涵蓋整個採樣區域。當目的是估算空間或時間關聯性，或確認污染濃度分佈方式時，以規則的間距採集樣品十分有用。系統網格採樣設計有下列優點：

- (1) 均勻、已知、完全的將採樣點於空間/時間上覆蓋在整個目標族群，在一定採樣數目下，網格採樣可以覆蓋樣區的最大空間；
- (2) 網格採樣的設計及執行相當直接，只需要一個計算機及測量儀器，田間佈點步驟的描寫很簡單，因一旦決定了起始點後，根據規則的空間或時間排列，可以使採樣人員能夠簡單的確認其他採樣地點；

- (3)規則的空間或時間所採得的樣品，可以計算空間或時間上的關聯性，如果無法假設為獨立的族群及發現族群內樣品具有明顯特徵時，規則的空間採樣是估計及預測尚未採樣面積的唯一選擇；
- (4)在沒有樣區先前資訊的情況下，可以使用網格採樣；
及
- (5)可以用來尋找濃集區(hot spot)及推論平均值、百分比或其他參數，也可用來評估污染物濃度空間或時間的分佈方式。

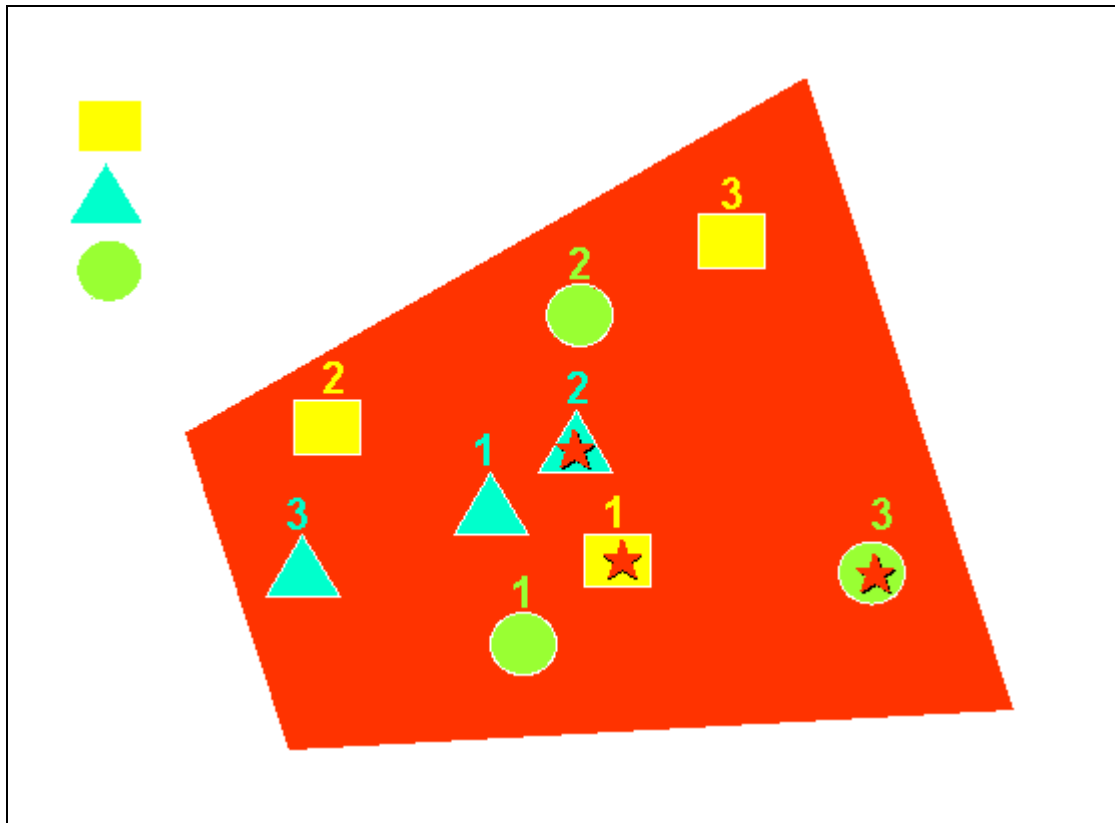
但是系統/網格採樣有下列限制：

- (1)當知道族群的先前資訊時，而這些先前的資訊可以做為分區或確認發現高濃度區的訊息時，採用系統網格採樣並不會如其他採樣設計般的有效率；及
- (2)如果族群性質沿著網格成線性排列，可能會造成高估或低估族群特徵的機率。

(五)、級組採樣(Ranked Set Sampling)

級組採樣設計係將簡單逢機採樣與田間調查者的專業知識相結合，判斷在何處取得樣品，然而適當的田間篩選儀器也可以用來取代田間調查者的專業知識。級組採樣設計比簡單逢機採樣更能節省經費，因為級組採樣設計所採集及實驗分析的樣品數目較少。在選擇樣品位置時，利用專業知識判斷是使用級組採樣設計的有力誘因，可以目視判斷可疑污染區內具有不同含量污染物的地點，因此可以得到較具代表性之樣品，而能更準確估計所要的變異數。且由於樣品數目較少，當田間的採樣經費低於實驗室分析費時，此設計可以有有效的節省分析經費，並達到較好估算土壤平均值濃度，但是有效的應用此方法，則必須是專業判斷或分級方法(田間篩選儀器)及實驗室分析有強烈關係時，級組採樣設計樣品的選擇如圖五所示。

雖然級組採樣設計在估算平均值時，優於簡單逢機採樣，但是計算級組採樣設計樣品數目的方法，例如測試假設，尚未被發展或只是初期的研究階段。雖然一般而言，級組採樣設計所需的樣品數較簡單逢機採樣為少，但是仍建議使用簡單逢機採樣所需的樣品數。土壤經污染改善後，難以

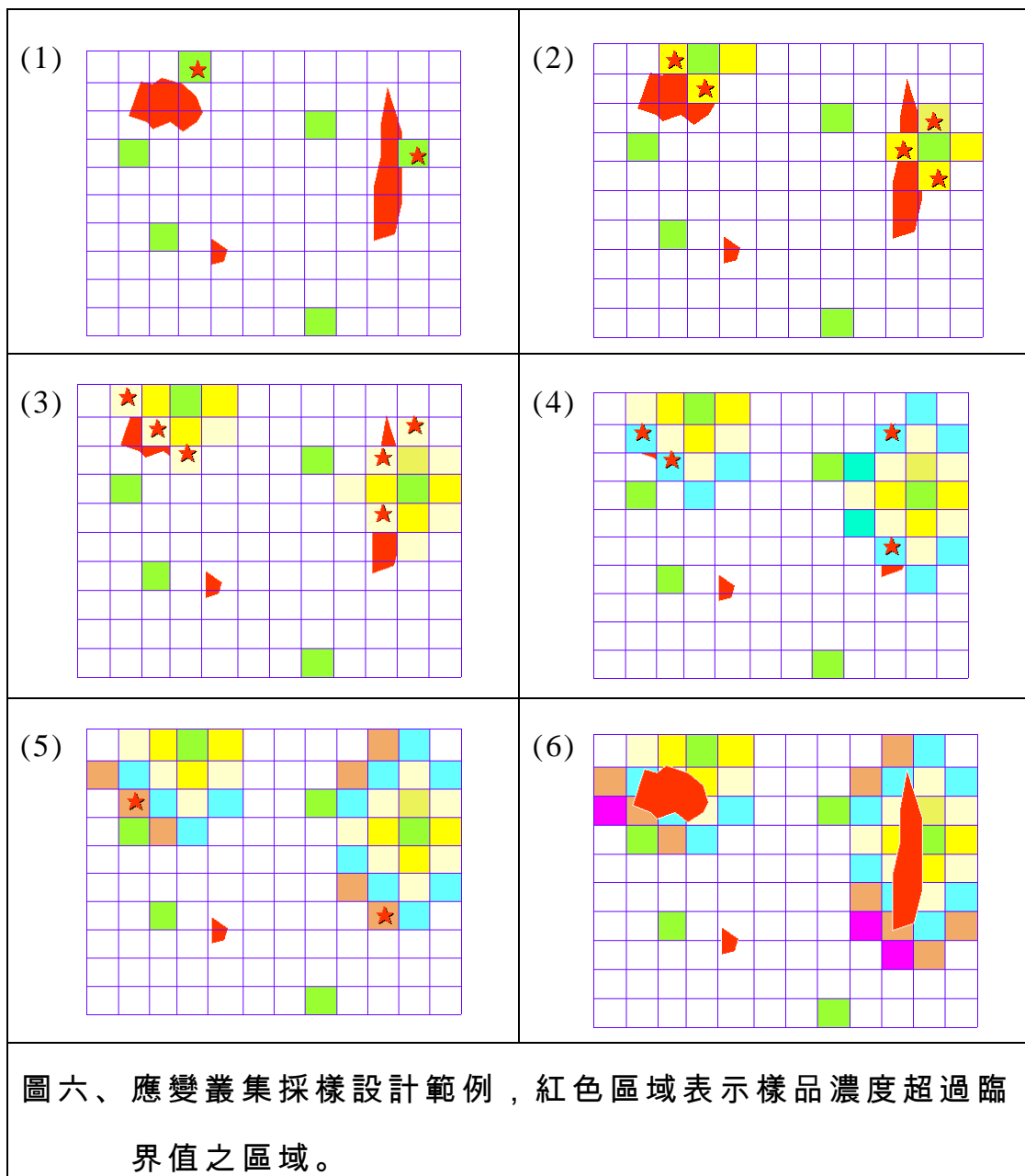


圖五、樣品組數分成三組，第一組樣品在田間以篩選儀器判斷區分成 1、2 及 3 種等級，選擇第 1 等級樣品(黃色星號)回實驗室分析，第二組選擇第 2 等級樣品(藍色星號)回實驗室分析，第三組選擇第 3 等級樣品(綠色星號)回實驗室分析。

用目視判斷田間污染濃度的分佈情形，因此無法由專業判斷對污染樣區採樣點濃度進行專業判斷分級，而因此必須借助於田間篩選儀器，但是田間篩選儀器如 X 射線螢光偵測儀 (XRF)，也只有對粗質地土壤之少數幾種重金屬如鉛、鋅及銅有較好相關性。

(六)、應變叢集採樣(Adaptive Cluster Sampling)

應變叢集採樣設計的初步樣品採集，是先根據簡單隨機採樣而得到，當發現部分採樣點重金屬濃度達到所感興趣的標準時，再進一步於該採樣點附近進行第二波或更多的採樣及分析，如圖六所示。因此是一種基於初步調查中所得



的數據解釋，而後再持續增加採樣點的設計，所增加的樣品則是來自於原先對族群樣品的調查。應變叢集採樣在環境上的利用，包括土壤污染改善(調查土壤污染的分佈程度)、有害廢棄物場址特性與調查污染場址影響範圍。

應變叢集採樣設計有下列幾個優點：

- (1) 應變叢集採樣設計不像其他採樣設計只有一個目的，它同時可估算平均值及界定出污染範圍，應變

叢集採樣設計可以將資源用在高濃度的區域上，例如在濃集區的調查上；

(2)可以快速的顯現出調查結果，而且允許較少次數的採樣頻率。

但是缺點有：

(1)採樣、測試及重新採樣與測試過程，需要相當多的時間；

(2)如果沒有快速且便宜的田間篩選儀器，採樣經費將十分可觀，因為只有當不再發現所觀察性質存在時，採樣過程才告終止，因此最後所需的樣品總數未知，而這也使得總花費成未知數；

(3)必須假設所觀察性質的分佈範圍不大；及

(4)受限於統計理論及估算平均值及變異的分析方法，只有在最初樣品的選擇是採用機率方式時，由此所估算的平均值及變異數才會無偏誤。

(七)、混樣採樣(Composite Sampling)

混樣採樣設計是物理性的將幾個亞樣品，均勻混合成為一個新的樣品，如圖七所示，因為物理性混合使不同的樣品平均化，而幾個混合樣品的平均值，可以產生一個估算的平均值，其精確度與和多個樣品個別分析所得的估算平均值一樣。因此用來估算平均值的混樣採樣法相當適用，且由於只分析較少量的樣品，所以當分析經費遠高於樣品的採集、操作及混合時，混樣採樣法可以節省相當多的分析費用。

混樣採樣法的優點如下：

(1)在相同或較低花費下，其採樣範圍可以涵蓋較多的目標族群(較好的代表性)；

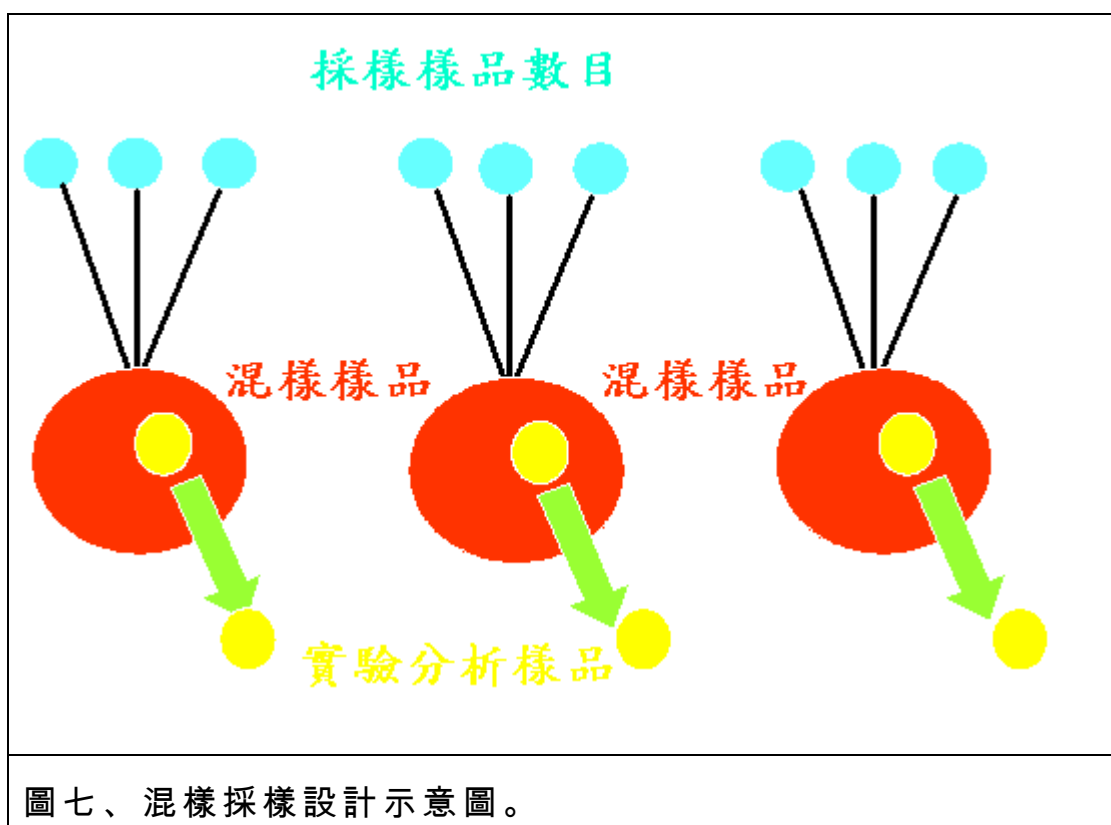
(2)資料分析很簡單，可以用簡單平均值估算族群平均值及；

(3)適用於評估一些稀有特性。

但缺點有：

(1)混樣採樣喪失了空間或時間變異性的資訊；

(2)土壤基質的混合效果不好；



(3)不適用於待測物為揮發性有機物及；

(4)如果待測元素為土壤本身的基本元素時，對於分析濃度是否超過污染改善後驗證濃度難以判斷。

四、結語

根據採樣分析結果而決定樣區土壤的重金屬分佈與含量，似乎是一個完美而簡單的法則，但事實上這個簡單法卻容易產生誤解，因為所取得的土壤樣品只佔整個樣區體積中非常小的一部分，在一公頃內數百萬公斤之土壤中，由於經費與時空的限制，往往所採集並分析的土壤樣品可能只有 30 至 40 公斤，在這種情況下，如何確保其他未採樣地區土壤的重金屬含量？因此又如

何對整個樣區土壤重金屬含量做出最後的結論？解決上述的問題，事實上可以藉由不同採樣設計的選擇來完成，而採樣設計的選擇必須根據原先的採樣目的來訂定，甚者上述的採樣設計可以根據不同的需求目的，而予以混合使用，以最經濟有效資源達到預期的目標。

採樣設計規劃的第一個工作，必須先行完成數據品質目標 (Data Quality Objectives) 的擬定，包括問題說明、確認問題、確認做成決定的輸入資料、定義工作範圍、發展決定法則、說明做出錯誤決定的容忍界線及將採樣設計最佳化等七個步驟，據此確認何時採集土壤樣品？在何處採集土壤樣品？做出錯誤決定之可容忍範圍及應該採集之樣品數量？最後詳實的將採樣設計紀錄於品質保證計畫書內，最後才進行土壤採集及分析工作，並依據分析所得的結果，檢視分析資料是否達到預期的數據品質保證規劃，如果是的話，才算達到原先所規劃的採樣目的，如果不是的話，則必須考慮變更採樣設計或是採集更多的樣品，以達到既定之採樣目標。

。