



土壤污染整治改善驗證準則之探討

Cleanup Standards for Verifying the Attainment of Soil Remediation

台大生工系
教授

張 尊 國

Tsun-Kuo Chang

台大生工系
博士班研究生

鄭 百 佑

Bai-You Cheng

東南技術學院環境工程系
副教授

涂 貴 新

Guey-Shin Shyu

摘 要

任何土壤污染整治改善實施後均需要驗證是否達成既定目標，本文提供一個分析方法來評估改善之成效。由於驗證樣品畢竟僅代表整個整治改善區非常小的一部分，在這種具有不確定之情況下所作之結論，實有必要將統計策略用於驗證方案之中。統計方法有一個強大的功能，按科學的推論有效的將採樣結果量化，可解釋整個改善場址之狀況並驗證其成效。

本文建議之驗證準則包含四個部分，第一：任何一個驗證樣本之濃度均需低於管制標準值，第二：採樣結果之累積機率 97.5% 對應之濃度值需低於管制標準值，第三：採樣結果之累積機率 50% 對應之濃度值需低於監測標準值，第四：改善整治工程之均勻度指標值需小於 2。

關鍵詞：土壤污染，整治改善，驗證方法。

ABSTRACT

This paper provides analysis methods for evaluating whether a soils remediation effort had been successful. Statistical methods are emphasized because there is a practical need to make decisions regarding whether a site has met a cleanup standard in spite of uncertainty. The uncertainty arises because only a small portion of the soil at the site are being able to sample and analyze yet having to make a decision regarding the entire site. Statistical methods are designed to permit this extrapolation from the results of a few samples to a statement regarding the entire site. The suggested guideline provides a technical interpretation of what data analysis methods are acceptable for verifying attainment of a cleanup standard in soils media.

The guideline includes four parts. The first component is the concentration of every sample should less than the control standard. The second component is the 97.5% probability of cumulative curve should not exceeds the control standard. The third component of the standard is the median concentration of sampling should below the monitoring standard. The fourth component is the indicator of evenness for the remedy works should less than 2.

Keywords: Soil pollution, Remediation, Verification method.

一、前言

台灣地區灌溉用水常受工業廢水之污染，環保機關鑒於台灣可能發生類似日本之鎘米污染事件，故於民國 71 年著手進行土壤污染防治工作，將食用農作物生長之農田土壤重金屬調查列為優先防治之重點工作，土壤為環境中的主要受體之一，但因其擴散、稀釋能力較低，因此土壤中毒性物質之累積現象較為顯著。據環保單位之調查資料顯示，台灣地區土壤污染之來源由廢水導致為主，依據 81 年至 89 年土壤重金屬細密調查結果顯示，重金屬含量列為第五級之累積面積計 1024 公頃，造成污染之主因為灌溉水遭廢水污染，其中以彰化縣、桃園縣、台北縣之受污染面積較多，主要重金屬項目為鎘、鋅、銅、鎳。

土壤及地下水污染整治法經過立法公告後，環保署由累積之第五級之面積中扣除銅、鋅五級地區，其餘 319 公頃優先進行調查，經以地號為單元清查完畢全台農地重金屬污染情況，根據統計全台共有 252 公頃農地受重金屬污染。受重金屬污染最嚴重的前五個縣市依次為：彰化縣 184 公頃、新竹市 28 公頃、桃園縣 11.46 公頃、屏東縣 6.9 公頃、台中縣 6.34 公頃，如表 1 所示。土壤重金屬超過管制標準之多寡依序為鎳、銅、鎘、鋅、鎘、鉛、汞，本次調查結果並無超出管制標準之農地。

超過管制標準之農地均依法公告為控制場址，後續污染土壤整治在經費與工程技術考量下，主要將採取上下層土壤翻轉稀釋法，預計兩

年之內改善完成。國內土壤整治實例過去 12 年來，分別採用過化學及酸萃取法、土壤淋洗、換土、客土混合、植物復育及電動力等方法大多數僅限於研究之性質但其中針對桃園縣蘆竹鄉中福村受鉛鎘污染土壤進行翻土混合稀釋(陳,2001)則為僅有之土壤重金屬污染改善工程實際案例，改善成果並作為解除污染控制場址之行政依據。

依據「桃園縣蘆竹鄉中福地區鎘污染區南區翻土改善工程」土壤採樣檢測作業規範，土壤改善處理成果查核由工地工程師會同有關人員於現場每 1,000 平方公尺指定一地點採樣檢驗，土壤取樣須採表土(地表下 0~15 公分)與裡土(地表下 15~30 公分)各一樣本，每 3 公頃指定一地點採樣至 150 公分深度，分 10 層取 10 個樣本，送指定單位進行檢驗，土壤檢驗結果其鎘萃取含量須少於 1.0mg/kg，鉛萃取含量須少於 40mg/kg，才為合格土壤檢驗結果，當有任一樣本其土壤檢驗結果鎘含量高於 1.0mg/kg、鉛含量高於 40mg/kg 者，視為不合格。不允許任何一個驗證樣本之濃度超過標準值看似一個完美而簡單的判定規則。事實上這個簡單規則會產生誤解，雖然沒有任何一個樣本超過標準值，可是樣品畢竟僅代表整個整治改善區非常小的一部分，在一公頃數百萬公斤之土壤中可能只採到數十公斤，如何保證其他未採樣地區中之土壤沒有超過標準？在這種情況下如何下結論？因此實有必要將統計策略用於驗證方案之中，美國 EPA (1989, 1992) 就採用這種精神於污染場址之調查與整治驗證之中。

表 1 台灣地區土壤重金屬含量調查結果資料表

面積單位：公頃

縣市別	八種重金屬面積	主要重金屬種類及面積	面積 (扣除銅、鋅)	超過土壤污染管制標準面積	地區特性	水利會灌區
台北市	18	砷 3、汞 2、銅 3、鋅 12	4	0	為農地	非
高雄市	4	鉛 1、銅 2、鋅 1	1	0	為一般市街地	高雄
基隆市	6	鎳 1、鉛 3、鋅 2	4	0	為非農地	非
台北縣	79	鎳 19、鉛 7、銅 40、鋅 55	26	1.62	農地及非農地	桃園
桃園縣	121	鎳 3、鎳 9、鎳 1、鉛 5、銅 59、鋅 44	17	11.46	為農地	桃園
新竹縣	-		-	0		
新竹市	59	砷 1、鎳 22、汞 2、鎳 16、銅 28、鉛 5、鋅 48	32	27.54	為農地	新竹
苗栗縣	7	鋅 7	0	0.55	為農地	苗栗
台中縣	33	鎳 6、鎳 2、銅 2、鋅 29	7	6.34	為農地	台中
台中市	11	鎳 6、鉛 3、銅 5、鋅 1	9	0.3	為農地	台中
彰化縣	546	鎳 142、鎳 60、鉛 4、銅 242、鋅 466	178	184	為農地	彰化
南投縣	6	鉛 5、鋅 1	5	0.39	為農地	南投
雲林縣	1	鎳 1、鋅 1	1	0	為農地	雲林
嘉義縣	-		-	0		
嘉義市	13	鎳 7、鋅 7	7	0	為農地	嘉南
台南縣	29	鎳 2、鉛 5、銅 1、鋅 25	7	5.33	為農地	嘉南
台南市	32	鎳 1、鎳 1、鉛 10、銅 10、鋅 25	11	1.86	為農地	嘉南
高雄縣	41	鎳 1、鉛 7、銅 2、鋅 38	8	6.02	為農地	高雄
屏東縣	16	鎳 1、鉛 1、銅 1、鋅 13	2	6.9	為農地	屏東
宜蘭縣	-		-	0		
花蓮縣	1	鋅 1	0	0	為農地	非
台東縣	1	銅 1	0	0	為農地	非
澎湖縣	-		-	0		
合計	1024	砷 4、鎳 218、汞 4、鎳 80、銅 415、鉛 57、鋅 785	319	252.45		

1. 統計資料係指截至 90.08.31，各地方環保機關進行土壤重金屬含量調查結果列為第五級之累計面積數。
2. 超過土壤污染管制標準的農地面積係環保署 319 公頃計畫調查資料。
3. 本表之面積係以一公頃為調查單位估算而得，內含農田道路、房舍與水路等面積。

二、方法與材料

(一) 分析方法

1. 採樣數據之擬合與檢定

驗證採樣資料特性分析與檢定流程如下圖 1 所示。採樣數據經擬合與檢定後，可分類為常態、對數常態、三角型、均勻等型態之分配函數，

可繪製直方圖或機率分配函數圖 probability density distribution function (PDF)，其步驟說明如下。

1-1 選擇適合的分配函數來擬合

(1) 連續和不連續分佈評估

資料分配型態，是否為連續型態，或者不連續型態，進行改善工程後之土壤重金屬含量資

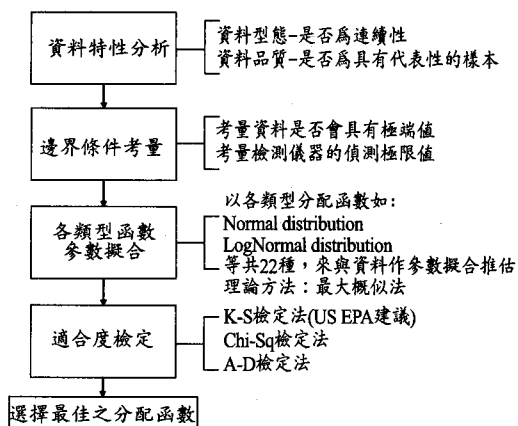


圖 1 資料特性分析與資料型態之檢定流程

料，是屬於連續型的資料，是故以連續型分配函數來擬合較為恰當。

(2) 推估擬合參數及比較適合分佈

以選定之幾類連續型分配函數來與資料進行擬合，推估適當之擬合參數，再加以比較，那類型的分配函數，比較合適。

(3) 分佈邊界問題

欲擬合之分配型態邊界問題，依常理判斷經改善工程後之土壤重金屬之含量資料，均勻化後一定沒有負的檢測值或低於偵測極限，而且也不會有無限大的極端值存在。

(4) 理論方法

最大概似法(Maximum Likelihood Estimators, MLEs)

一個優良估計式必須具備不偏性、一致性、有效性等三種特性，而最大概似法就是得到優良估計式的一種方法，亦即，母體比率的最大概似估計值為樣本比率。

所以，最大概似估計法的基本原理就是找到某特定事件的聯合機率密度函數（最大概似函數），然後找讓這個聯合機率密度函數為最大的樣本統計量，此即最大概似估計量。

1-2 適合度檢定-檢定擬合函數是否通過檢定 (test of goodness-of-fit)

所謂適合度檢定係指接受或放棄在虛無假設 H_0 下所假設的機率值或母體分配型態的統計檢定方法。K-S 檢定法適用於適合度檢定，在單

表 2 第一施工區塊土壤回填前鎘金屬採樣分析結果(0.1M HCl 萃取法)

採樣位置 及點位編號	濃度	國立中央大學 環境工程研究所		
		鎘 (Cd) (mg/kg)		
		上層	中層	下層
第一 施工 區塊	1-1	0.75	0.74	0.60
	1-2	0.86	0.77	0.44
	1-3	0.70	0.58	0.52
	1-4	0.84	1.46	0.74
	1-5	0.83	1.32	0.59

資料來源：(陳，2001)

一樣本的情況下，檢定其是否服從於某一理論機率分配或是否從某一理論機率分配抽出。而在無母數資料的統計檢定上美國 EPA(2000)則建議環境品質的實際運用上，以 K-S 檢定法較具有公信力。

2. 累積機率分佈函數 cumulative probability distribution (CDF)之製作

在風險評估時，機率分佈常被作為反映變異性與不確定性之最佳工具，機率分配函數 probability density distribution function (PDF)經積分後，即形成累積機率分佈函數 cumulative probability distribution (CDF)，如下圖 2 顯示了四種常見之機率分配函數與其對應之累積機率分佈函數，採樣分析數據經過資料特性分析與檢定流程，選定最佳之分配函數之後，即可製作濃度之累積機率分佈函數圖，協助驗收準則之評定，這些工作皆可利用現成之商業統計軟體工具如 @risk(2000)完成之。

(二) 資料來源

1. 桃園縣蘆竹鄉中福地區鎘污染區南區翻土改善工程各施工區塊之採樣驗證資料。

驗證共分為兩階段進行，首次於土壤回填前分層採樣，再次採樣則於土壤分層回填壓實後執行，將第一施工區塊回填前鎘金屬採樣分析結果與第三施工區塊土壤回填後驗收之鎘、鉛金屬採

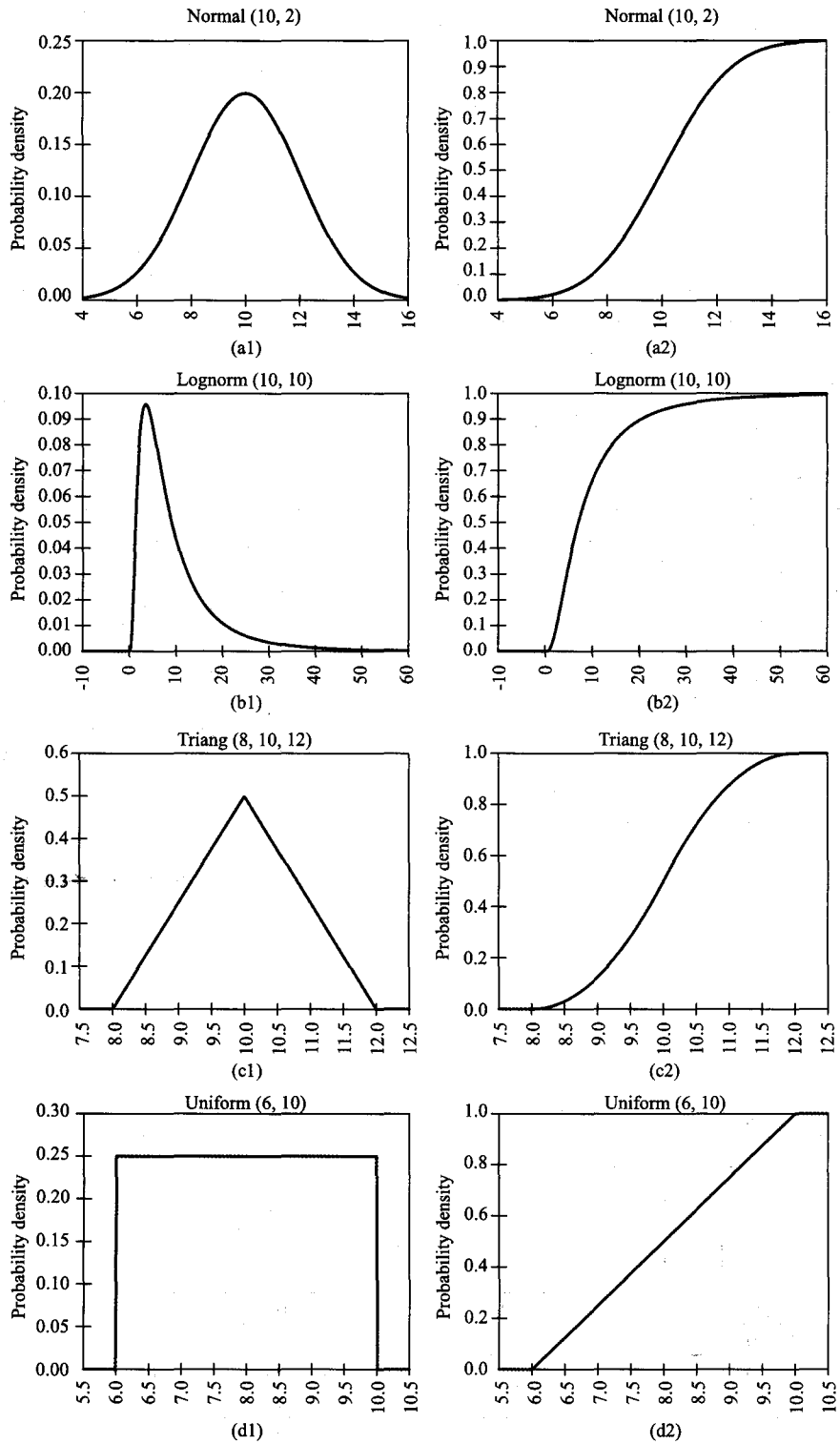


圖 2 常見之機率分配函數與其對應之累積機率分佈函數圖

表 3 第三施工區塊土壤回填後驗收之鎘、鉛金屬採樣分析結果(0.1M HCl 萃取法)

採樣位置 及點位編號	濃度	國立中央大學 環境工程研究所		採樣位置 及點位編號	濃度	國立中央大學/ 環境工程研究所			
		鎘 (Cd) (mg/kg)	鉛 (Pb) (mg/kg)			鎘 (Cd) (mg/kg)	鉛 (Pb) (mg/kg)		
第三施工區塊	II-3-1	0-15	0.73	9.04	II-3-11	0-15	0.63	9.75	
		15-30	0.78	9.91		15-30	0.08	4.99	
		30-60	0.72	9.77		30-60	0.38	8.95	
	II-3-2	0-15	0.68	8.69	II-3-12	60-90	0.46	8.87	
		15-30	0.69	8.78		0-15	0.56	9.85	
		30-60	0.21	6.86		15-30	0.59	10.54	
	II-3-3	0-15	0.30	7.18	II-3-13	30-60	0.73	11.31	
		15-30	0.26	12.96		60-90	0.54	11.04	
		30-60	0.21	6.64		0-15	0.57	9.66	
		II-3-4	60-90	0.23	6.65	II-3-14	15-30	0.90	10.49
	0-15		0.41	8.22	30-60		0.88	11.75	
	15-30		0.35	8.00	60-90		0.68	10.10	
	30-60		0.42	8.21	90-120		0.19	8.64	
	II-3-5	60-90	0.51	8.63	II-3-15	0-15	0.36	8.16	
		90-120	0.24	8.63		15-30	0.26	8.64	
		0-15	0.28	7.70		30-60	0.16	20.06	
		15-30	0.22	7.78		60-90	0.11	7.24	
	II-3-6	30-60	0.24	7.48	II-3-16	90-120	0.12	25.53	
		0-15	0.82	10.19		0-15	0.92	8.58	
		15-30	0.76	10.25		15-30	0.92	9.24	
	II-3-7	30-60	0.68	11.46	II-3-17	30-60	0.87	8.84	
		0-15	0.23	8.04		0-15	0.75	7.76	
		15-30	0.42	6.88		15-30	0.52	8.05	
	II-3-8	30-60	0.46	8.16	II-3-18	30-60	0.09	5.54	
		0-15	0.35	8.69		0-15	0.62	7.76	
		15-30	0.22	7.25		15-30	0.54	9.26	
	II-3-9	30-60	0.20	8.04	II-3-19	30-60	0.51	7.81	
		0-15	0.36	7.11		0-15	0.29	12.00	
		15-30	0.38	8.19		15-30	0.76	12.37	
		30-45	0.33	8.01		45-60	0.76	12.25	
		45-60			0.21	7.52	60-90	0.22	12.77
		60-75	0.23	6.66			0-15	0.34	12.97
		75-90					II-3-20	15-30	0.65
	90-105	30-60			0.44	13.27			
	105-120	60-90			0.30	17.88			
	0-15	0.37	8.50	90-120	0.29	15.81			
	15-30	0.39	7.61	0-15	0.26	14.17			
	30-60	0.63	7.36	15-30	0.25	13.98			
	60-90	0.65	7.59	30-60	0.22	13.64			
	90-120	0.10	5.84	註：本採樣時間為 89/11/28					

資料來源：(陳，2001)

表 4 試區第二塊田翻土前 25 採樣點鎘金屬之濃度(0.1M HCl 萃取法)

樣品編號	Cd --mg/kg	樣品編號	Cd --mg/kg	樣品編號	Cd --mg/kg	樣品編號	Cd --mg/kg
2011*	0.44	2081	0.80	2141	0.54	2201	0.32
2	0.36	2	0.66	2	0.38	2	1.13
2021	0.38	2091	1.49	2151	0.51	2211	1.00
2	0.40	2	1.06	2	0.60	2	0.35
2031	0.47	2101	0.71	2161	0.26	2221	0.39
2	0.45	2	0.40	2	0.14	2	0.37
2041	1.08	2111	0.82	2171	0.30	2231	0.54
2	0.90	2	0.25	2	0.16	2	0.69
2051	1.02	2121	0.42	2181	0.17	2241	0.44
2	1.00	2	0.44	2	0.14	2	0.36
2061	0.40	2131	0.67	2191	0.13	2251	1.39
2	0.34	2	0.74	2	0.18	2	0.61
2071	0.48						
2	0.19						

*: 樣品號碼第一字為地點, 第二、三字為每一塊田之樣品號, 最後一字為 1 表示 0-15 公分表土 2 表示 15-30 公分裏土。(王, 1996)

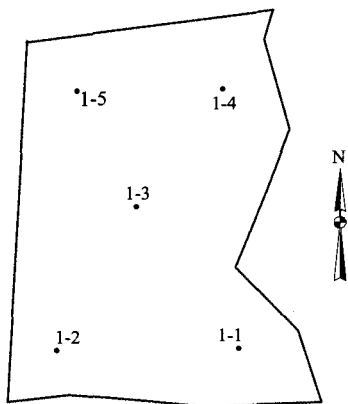


圖 3 第一施工區塊回填前土壤重金屬採樣點位示意圖。資料來源(陳, 2001)

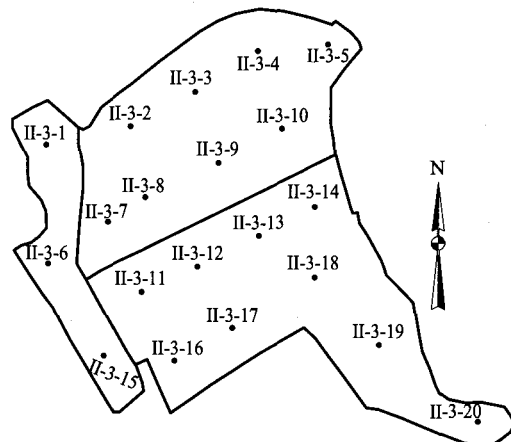


圖 4 第三施工區塊工程驗收之土壤重金屬採樣點位示意圖(陳, 2001)

樣分析結果, 如表 2、表 3、圖 3 與圖 4 所示, 當成案例加以分析討論。

2. 彰化縣花壇鄉受重金屬污染區翻土改善工程之採樣驗證資料如表 4 與表 5 所示。

三、結果與討論

3-1 改善工程之驗收準則建議

以往污染改善工程施工完畢後之驗證均藉由專家組成之小組以專業判斷決定是否達到目

標, 通常有一定數量之採樣且任何一個驗證樣本之濃度均未超過標準值(管制值), 即完成驗收。

本文建議之改善工程驗收準則如表 6 所示, 必須同時符合四項準則才算改善完成符合驗收標準。

說明如下:

準則 1: $x_i < \text{管制值}$ 與傳統之準則相同, 所採之任一樣本均須符合標準(小於管制值), 按土壤及地下水污染整治法第 11 條, 超過管制標

表 5 試區第二塊田翻土後 25 採樣點鎘金屬之濃度(0.1M HCl 萃取法)

樣品 編號	Cd --mg/kg	樣品 編號	Cd --mg/kg	樣品 編號	Cd --mg/kg	樣品 編號	Cd --mg/kg
2011*	0.22	2081	0.12	2141	0.34	2201	0.07
2	0.12	2	0.09	2	0.16	2	0.31
2021	0.21	2091	0.07	2151	0.29	2211	0.24
2	0.11	2	0.08	2	0.10	2	0.12
2031	0.04	2101	0.20	2161	0.02	2221	0.12
2	0.01	2	0.17	2	0.12	2	0.10
2041	0.10	2111	0.37	2171	0.02	2231	0.04
2	0.20	2	0.54	2	<.01	2	0.12
2051	0.09	2121	0.32	2181	0.13	2241	0.01
2	0.21	2	0.54	2	0.12	2	0.24
2061	0.26	2131	0.40	2191	0.05	2251	0.26
2	0.12	2	0.63	2	0.05	2	0.38
2071	0.13						
2	0.21						

*: 樣品號碼第一字為地點, 第二、三字為每一塊田之樣品號, 最後一字為 1 表示 0-15 公分表土 2 表示 15-30 公分裏土。(王, 1996)

表 6 改善工程之驗收準則建議

	驗收準則	說明	功用
準則 1	$x_i < \text{管制值}$	所採之任一樣本均符合標準	法規限定
準則 2	$C_{97.5} < \text{管制值}$	累積機率之 $C_{97.5}$ 值低於管制值	防範因採樣數低於 40 以下所造成的風險
準則 3	$C_{50} < \text{監測值}$	累積機率之 C_{50} 中值(median)低於監測值	改善完成後不會淪為監測場址每年需要監測
準則 4	$C_{75}/C_{25} < 2.0$	均勻度指標	改善工程之施工品質檢定

準污染源明確, 即公告為控制場址, 依 319 公頃調查計畫之經驗, 同一地號中任一樣品超過管制標準即篩選為控制場址, 故驗證時亦需要求任一樣本均符合標準。

準則 2: $C_{97.5} < \text{管制值}$ 有時基於採樣分析費用昂貴, 驗證時採樣數目有限, 即使全部符合準則 1 之規定, 並不代表保證完全改善成功, 如採 9 個樣品合格, 仍然表示有十分之一的可能性超過標準, 故準則 2 ($C_{97.5} < \text{管制值}$) 在防範因採樣數低所造成的風險。

準則 3: $C_{50} < \text{監測值}$ 按土壤及地下水污染整治法第 5 條, 低於管制標準而高於監測標準者, 應定期監測, 而監測結果應公告, 改善後如僅低於管制標準時, 依然造成爾後監測工作之負擔, 故改善成功須符合此準則, 以防改善後淪為監測場址需要定期監測。

準則 4: $C_{75}/C_{25} < 2.0$ 改善工程之施工後, 因經過均勻化(如翻土稀釋)之過程, 施工品質好壞可經由本準則檢定, 由於一般統計軟體均能計算 Inter-quartile range (25^{th} to 75^{th} percentiles), 且這一部分之值與曲線最為密合, 故選擇 C_{75}/C_{25} 作為指標。

如果在改善施工中經過絕對之充分混合, 理想狀況下任何一個採樣結果均相同, 因此累積機率分佈函數為 step function, 但於實際狀況中無法如此切合, 茲將理想狀況與實際狀況之濃度之累積機率分佈函數圖表示如圖 5 之中。斜率越陡之處表示越集中也越趨近理想狀態。

3-2 案例試算

以上之準則經「桃園縣蘆竹鄉中福地區鎘污染區南區翻土改善工程」以及「彰化縣花壇鄉受

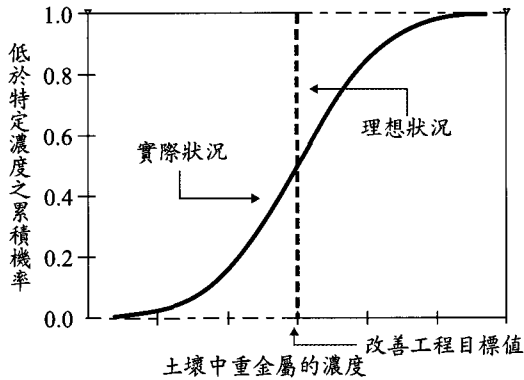


圖 5 改善施工後理想狀況與實際狀況之累積機率分佈函數圖

重金屬污染區翻土改善工程」，案例實際測試如下：

案例一：桃園第一施工區塊土壤回填前重金屬鎘(Cd)採樣分析驗證，上、中、下層共有 15 筆資料，經翻土混合後採樣雖分層，但資料共同處理，結果如圖 6 所示。

案例二：桃園第三施工區塊土壤回填後重金屬鎘(Cd)採樣分析驗證，各層共 76 筆資料，結果如圖 7 所示。

案例三：桃園第三施工區塊土壤回填後重金屬鉛(Pb)採樣分析驗證，各層共 76 筆樣本，結果如圖 8 所示。

案例四：彰化試區第二塊田翻土前重金屬鎘(Cd)採樣分析驗證，上下層共 50 筆資料，結果如圖 9 所示。

案例五：彰化試區第二塊田翻土後重金屬鎘(Cd)採樣分析驗證，上下層共 50 筆資料，結果如圖 10 所示。

3-3 整治改善成效之討論

原來之驗證準則：當有任一樣本其土壤檢驗結果鎘含量高於 1.0mg/kg 或鉛含量高於 40mg/kg 者，視為不合格。表 7 為本計畫建議之改善工程驗收準則試算結果並加以評析。

案例一為桃園改善工程第一施工區塊土壤回填前重金屬鎘(Cd)採樣分析驗證結果，有三項指標不符，實際情況須改善加強混合施作。

表 7 驗收準則案例試算結果表

案例一	驗收準則	比對	結果
準則 1	$x_i < 1.0$	0.44~1.46	不符
準則 2	$C_{97.5} < 1.0$	1.548	不符
準則 3	$C_{50} < 0.5$	0.7196	不符
準則 4	$C_{75}/C_{25} < 2.0$	$0.8793/0.6057=1.45$	合格
案例二	驗收準則	比對	結果
準則 1	$x_i < 1.0$	$0.09\sim 0.92 < 1.0$	合格
準則 2	$C_{97.5} < 1.0$	$0.8964 < 1.0$	合格
準則 3	$C_{50} < 0.5$	$0.4012 < 0.5$	合格
準則 4	$C_{75}/C_{25} < 2.0$	$0.5880/0.2579=2.28$	不符
案例三	驗收準則	比對	結果
準則 1	$x_i < 40.0$	$4.99\sim 25.53 < 40.0$	合格
準則 2	$C_{97.5} < 40.0$	$17.9098 < 40.0$	合格
準則 3	$C_{50} < 20.0$	$8.9328 < 20.0$	合格
準則 4	$C_{75}/C_{25} < 2.0$	$10.7085/7.6433=1.40$	合格
案例四	驗收準則	比對	結果
準則 1	$x_i < 1.0$	0.13~1.49	不符
準則 2	$C_{97.5} < 1.0$	1.7246	不符
準則 3	$C_{50} < 0.5$	$0.4663 < 0.5$	合格
準則 4	$C_{75}/C_{25} < 2.0$	$0.6883/0.3172=2.17$	不符
案例五	驗收準則	比對	結果
準則 1	$x_i < 1.0$	$0.01\sim 0.63 < 1.0$	合格
準則 2	$C_{97.5} < 1.0$	$0.5735 < 1.0$	合格
準則 3	$C_{50} < 0.5$	$0.1445 < 0.5$	合格
準則 4	$C_{75}/C_{25} < 2.0$	$0.2433/0.0800=3.04$	不符

案例二為桃園改善工程第三施工區塊土壤回填後重金屬鎘(Cd)採樣分析驗證結果，有三項指標合格，一項指標不符，實際情況因任一樣本其土壤檢驗結果鎘含量均小於 1.0mg/kg 通過驗收，但可從資料中看到濃度由 0.09mg/kg 至 0.92mg/kg，相差十倍顯示混合不均，工程品質不佳。

案例三為桃園改善工程第三施工區塊土壤回填後重金屬鉛(Pb)採樣分析驗證結果，四項指標全部合格，實際情況因任一樣本 Pb 含量均小於 40.0mg/kg 通過驗收。

案例四為彰化改善工程試區第二塊田翻土前重金屬鎘(Cd)採樣分析結果，有三項指標不合，此為改善工程前試測鎘金屬含量，實際情況因任一樣本其土壤檢驗結果含量有大於 1.0mg/kg 者，所以為管制場址，但由 C_{50} 指標合

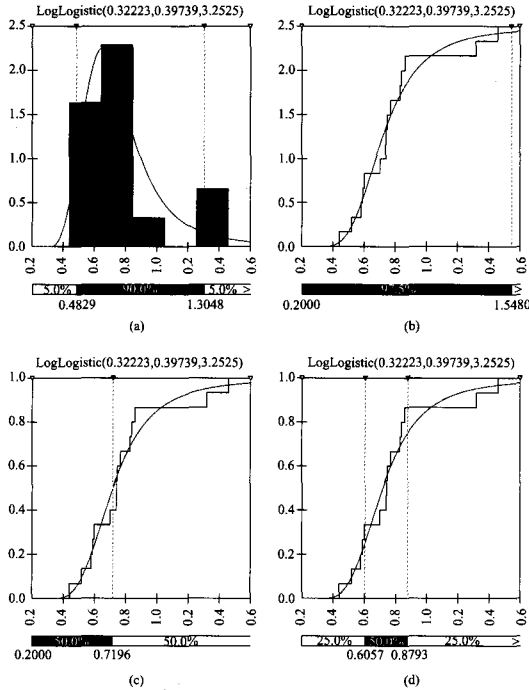


圖 6 (a)鎘(Cd)採樣資料及最適合分佈函數擬合, (b)累積機率 97.5%之鎘金屬濃度值, (c)累積機率 50.0%之鎘金屬濃度值, (d)累積機率 75.0%及 25.0%之鎘金屬濃度值 (案例一)

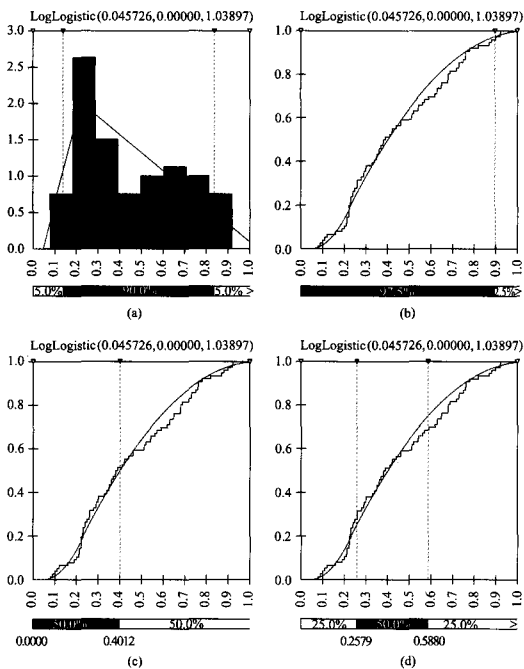


圖 7 (a)鎘(Cd)採樣資料及最適合分佈函數擬合, (b)累積機率 97.5%之鎘金屬濃度值, (c)累積機率 50.0%之鎘金屬濃度值, (d)累積機率 75.0%及 25.0%之鎘金屬濃度值 (案例二)

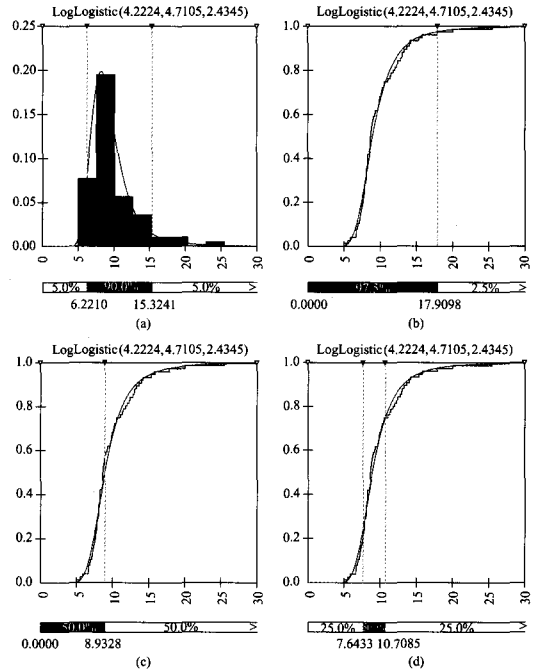


圖 8 (a)鉛(Pb)採樣資料及最適合分佈函數擬合, (b)累積機率 97.5%之鉛金屬濃度值, (c)累積機率 50.0%之鉛金屬濃度值, (d)累積機率 75.0%及 25.0%之鉛金屬濃度值 (案例三)

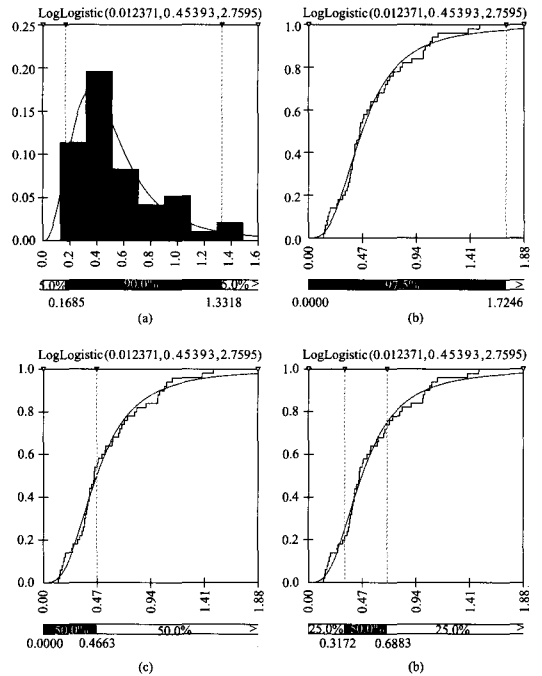


圖 9 (a)鎘(Cd)採樣資料及最適合分佈函數擬合, (b)累積機率 97.5%之鎘金屬濃度值, (c)累積機率 50.0%之鎘金屬濃度值, (d)累積機率 75.0%及 25.0%之鎘金屬濃度值 (案例四)

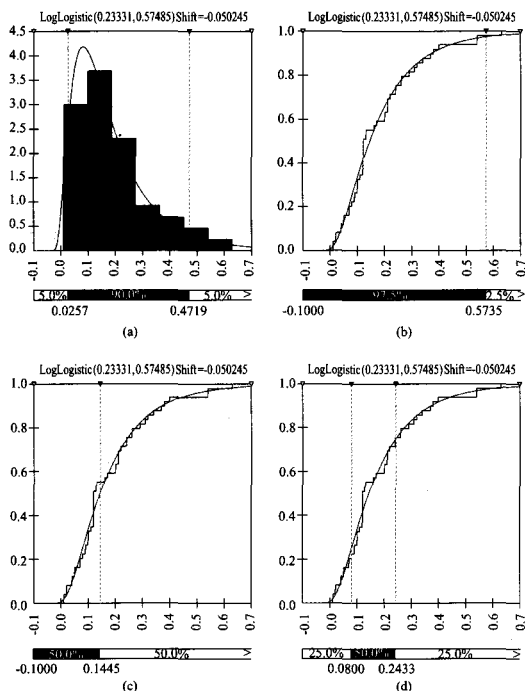


圖 10 (a)鎘(Cd)採樣資料及最適合分佈函數擬合, (b)累積機率 97.5%之鎘金屬濃度值, (c)累積機率 50.0%之鎘金屬濃度值, (d)累積機率 75.0%及 25.0%之鎘金屬濃度值 (案例五)

格情形以及 C_{75}/C_{25} 指標不合格情形來判斷, 此田區鎘金屬分佈極度不均, 大部份的田區為未受污染, 僅有少部分為污染區, 翻土改善工程前有三項指標不合格。

案例五為彰化改善工程試區第二塊田翻土後重金屬鎘(Cd)採樣分析結果, 有三項指標合格, 一項指標不合格, C_{75}/C_{25} 指標顯示田區之均勻度依然不佳, 可能原因有二: 田區污染濃度極度不均, 混合不易完全均勻; 其二為本計畫為研究性質, 由於經費限制施工品質不佳。

由以上之案例試算顯示, 本建議準則合乎實用, 可改進目前之驗收方法, 但準則 3 及準則 4 可因應個案背景不同而調整, 如經費有限對低污

染區可僅採準則 1、2、3 驗收; 而高污染區無法達到準則 3 時, 如符合準則 4 表示工程上已盡力亦准予驗收。

四、結 論

由於國內土壤污染場址之數目日益增加, 日後在整治經費有限的情況下, 勢必採用較經濟之現地翻土混合稀釋法, 而有限之驗證經費如何能評斷場址之整治改善成效。本文建議之方法可依個案背景環境、污染物特性、土地使用標的、法規限制、專家意見等稍作調整後提供作為整治改善成效驗收之準則。

參考文獻

1. 王銀波, 1996, 翻轉法應用於農田土壤污染改善之研究, 行政院環境保護署, EPA-86-E3H1-09-04。
2. 陳慶和, 2001, 桃園縣蘆竹鄉中福地區鎘污染區第二期翻土改善工程監工與管理。
3. US EPA, 1989, Methods for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards. Washington, D.C., US EPA/230/02-89-042.
4. US EPA, 1992, Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies. Washington, D.C., US EPA/600/R-92/128.
5. US EPA, 2000, Guidance for Data Quality Assessment-Practical Methods for Data Analysis. Washington, D.C., US EPA/600/R-96/084.
6. Palisade Corporation, 2000, @RISK 4.0.5.

收稿日期: 民國 92 年 5 月 30 日

修正日期: 民國 92 年 7 月 3 日

接受日期: 民國 92 年 7 月 14 日