



污染土壤的整治

劉黔蘭 土壤環境科學系

一、前言

土壤污染指土壤因物質、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。台灣農地受污染情況日益嚴重，1984年發生於桃園地區的鎘米事件是首件因工業廢水污染農田，進而影響食用作物安全的案例。1994年桃園RCA廠址因工業廢棄物處理不當造成土壤及地下水受污染，影響到附近居民飲用水取用為另一重大案例。1997年桃園南崁交流道附近發生輸油管破裂，重油漏至農田，造成約十公頃水稻受損。這些被污染土地的整治需要相當龐大的經費及技術，訂定具體可循的法令是最佳的策略。2000年2月2日總統令公佈「土壤及地下水污染整治法」含總則、防治措施、調查評估措施、管制措施、整治復育措施、財物及責任、罰責、附則等，計八章51條，並於5月4日函該法公佈施行後過渡時期執行要點。2001年陸續公告施行細則及土壤污染管制標準等，明確的顯示污染土壤整治的執行性。

二、整治方法

當土壤被診斷為污染，應加以整治，土壤污染整治復育技術很多，可分為物理、化學及生物三大類。物理類有客土、排土、翻轉、電熔、浮除、氣提等處理方法，化學類有萃取、淋洗、安定、固化、還原等處理方法，生物類有栽培非食用作物、微生物降解等處理方法。摘述較常用者如下：

(一) 化學處理

1. 萃取法

係利用污染物與萃取劑間之交互結合，兩者一併自土壤中分離出來，達到清潔土壤之目的。一般用於受重金屬污染之土壤萃取劑可為稀酸溶液或鉍合劑溶液。

2. 安定化/固化

安定化係能將污染物之毒性、溶解性與流動性降至最低，但不需改變其物理特性之處理技術，在技術上主要有吸附、離子交換和沉澱法，固化則是以一高強度石化體匣限廢棄物，其中固化劑與污染物間通常不發生化學反應，僅是機械拌合。安定化/固化技術用以限制污染物的釋出或污染群之漫流。

3. 還原法

最常應用於重金屬處理者，如將六價鉻還原成三價鉻，以降低其毒性。

(二) 物理處理

1. 排土客土法

此法係為徹底消除污染問題且在時程上最為迅速之方法，但就經濟因素之考慮甚難全面施行。

2. 現地電熔

以電能轉變成熱能之物理方法，其原理係將電極棒插入待處理區域之土壤中，通入高壓電以融化待處理區域之土壤。當融化物質逐步冷卻後，即成為類似玻璃之穩定物質。其缺點在於大量電力之消耗，造成處理成本大幅提高，電熔產生之氣體需以氣罩收集並依污染性質加以處理，亦增加處理成本及複雜度。

3. 深耕翻轉

係將未受污染的深層土壤翻至表面，可降低污染物之濃度。

(三) 生物處理

1. 於污染場址上設生物反應槽處理開挖出來之土壤
2. 經由微生態調理技術，培養好氧性微生物現地處理污染土壤
3. 透過植物生長，攝取土壤中之污染物質，藉以降低污染濃度。

三、案例

台灣地區發生數件農地受污染案件，今將數處改善成果舉例如後：

[例一]翻轉法

彰化縣花壇某處因稻米鎘濃度高於衛生標準0.5 mg/ kg而休耕，該農地縱剖面每5公分採一土樣，其0.1 M鹽酸抽出鎘、鉻、銅、鎳、鉛及鋅6種重金屬濃度如表一，除鉛外，5種重金屬以表土較下層土為高，可能因水田灌溉水污染，50公分以下為原土濃度，採翻轉法將高重金屬濃度之表土翻入下部而將其下低重金屬濃度之裡土轉至上部，有稀釋效果。試區翻轉前後之土壤理化性質及重金屬濃度如表二及表三，表土之可溶性鹽類(EC)、有機質含量、交換性鉀及重金屬濃度降低。若要栽培水稻，施用堆肥可提高產量，效果如表四，栽培水稻兩年，其糙米及白米中鎘濃度均甚低。

表一、試區每5cm深土樣中鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅之濃度(0.1M HCl萃取法)

深度 cm	mg/kg					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
0-5	0.42	6.30	53.16	27.63	13.09	27.31
5-10	0.43	12.10	49.39	27.82	13.12	20.43
10-15	0.48	6.38	43.23	21.29	15.66	18.43
15-20	0.56	14.59	72.84	49.81	10.95	21.85
20-25	0.49	7.18	53.11	26.20	9.80	23.01
25-30	0.42	5.16	47.23	23.56	9.10	21.87
30-35	0.43	3.80	38.61	22.73	9.24	21.99
35-40	0.43	1.80	23.45	18.78	8.84	18.41
40-45	0.32	1.29	16.01	13.84	8.49	12.72
45-50	0.19	0.26	7.91	4.47	8.45	5.50
50-55	0.15	0.33	7.05	2.79	7.22	5.43
55-60	0.14	0.28	5.19	1.62	6.00	4.24
60-65	0.16	0.31	5.07	1.75	5.08	5.70
65-70	0.18	0.38	6.19	2.36	3.21	7.84
70-75	0.19	0.32	6.27	2.43	2.16	7.96
75-80	0.16	0.19	5.53	1.78	1.53	7.35
80-85	0.15	0.14	5.80	1.42	1.27	6.07
85-90	0.15	0.14	5.56	1.28	1.71	5.78
90-95	0.16	0.16	5.01	1.19	3.25	5.29
95-100	0.16	0.12	5.22	1.09	5.85	4.57
100-105	0.18	0.28	5.45	1.55	5.52	5.94
100-110	0.17	0.23	4.26	1.21	5.88	5.69
110-115	0.21	0.37	6.00	2.77	8.65	6.54
115-120	0.19	0.30	5.71	1.47	8.46	5.15
120-125	0.22	0.20	5.37	1.47	10.40	4.67
125-130	0.20	0.06	5.30	0.85	10.23	2.94
130-135	0.21	0.06	5.99	0.70	11.50	2.49
135-140	0.15	0.03	5.03	0.24	10.74	1.51
140-145	0.13	0.08	4.86	0.52	9.68	1.49
145-150	0.18	0.03	5.57	0.35	11.76	2.00

表二、試區翻轉前後之土壤理化性質

	樣品編號	pH	EC $\mu\text{S/cm}$	有機質 %	銨態氮	硝酸態氮	有效性磷交換性鉀		交換性鎂
							mg/kg		
翻轉前	11	6.1	264	3.45	131	84	18.6	133.0	435
	12	6.4	147	2.23	119	32	18.1	76.0	412
	21	6.4	222	3.25	127	59	12.6	99.6	391
	22	6.4	144	2.06	114	37	10.2	56.3	359
翻轉後	11	7.2	112	1.90	130	50	19.2	76.6	403
	12	7.1	103	2.03	140	41	21.1	84.5	410
	21	7.1	119	1.14	105	58	10.7	61.3	410
	22	7.0	125	1.47	130	48	11.2	63.0	400

表三、試區翻轉前後土壤鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅之濃度(0.1M HCl萃取法)

	樣品編號	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅
翻轉前	11*	0.65	3.98	38.0	22.5	8.76	18.8
	12	0.64	3.02	28.9	18.4	6.20	14.4
	21	0.55	8.71	63.1	28.6	9.53	26.9
	22	0.48	4.28	40.8	20.3	6.71	22.2
翻轉後	11	0.35	1.79	14.7	9.03	8.38	11.7
	12	0.46	2.45	19.2	14.0	9.07	14.0
	21	0.23	1.77	14.8	7.27	7.75	10.2
	22	0.26	2.38	17.3	8.36	8.13	10.6

*表二、表三中：樣品編號第一字為地點，1為田號十八之一，2為田號十九之三；第二字為1表示0-15公分表土，2表示15-30公分裡土。

表四、施用堆肥影響兩作水稻產量及米鎘濃度

	堆肥用量tons/ha	水稻產量kg/ha	糙米鎘濃度mg/kg	白米鎘含量mg/kg
1997	5	8129	0.06	<0.01
	10	10326	0.01	<0.01
	15	8887	0.04	<0.01
1998	3.3	7515	0.10	0.10
	6.6	8256	<0.01	<0.01
	10	8884	<0.01	<0.01

[例二]鉍合劑淋洗法

彰化市某農田灌溉水口5公尺內土表15公分土壤中0.1M鹽酸抽取鎘、銅、鎳及鋅濃度分別高達14.1、237、139及2159 mg/kg，以各級濃度兩鉍合劑淋洗可移除重金屬結果

如表五。淋洗後土壤栽培青江白菜，結果如表六，DTPA淋洗者最能降低植體重金屬濃度，且收成植體中鎘濃度符合北歐食品工業委員會所訂定的蔬菜作物中鎘最大容許0.1 $\mu\text{g/g}$ 鮮重。

表五、兩鉗合劑移除污染土中鎘銅鎳及鋅

處 理	mg/kg			
	鎘	銅	鎳	鋅
去離子水	0.01 ^a	0.96 ^a	0.87 ^a	1.99 ^a
EDTA _{0.005M}	9.93 ^b	93.2 ^b	68.9 ^c	1036 ^c
DTPA _{0.005M}	9.77 ^b	118 ^c	57.7 ^b	787 ^b
EDTA _{0.05M}	13.2 ^c	270 ^d	259 ^d	2694 ^d
LSD _{0.05}	0.85	17.6	11.0	137

註：五重複之平均 LSD：最小顯著差異 a,b,c,d：差異水準

表六、兩鉗合劑淋洗對栽培青江白菜鮮重及其中鎘銅鎳鋅濃度之影響

處理	鮮重 g/pot	mg/kg			
		鎘	銅	鎳	鋅
未處理	55.8 ^a	0.72 ^a	3.14 ^a	0.74 ^a	46.6 ^a
去離子水	63.6 ^a	0.43 ^b	1.99 ^b	0.78 ^a	27.7 ^b
EDTA _{0.005M}	64.1 ^a	0.10 ^c	1.67 ^b	0.71 ^a	10.3 ^c
DTPA _{0.005M}	75.7 ^b	0.06 ^d	1.61 ^b	0.45 ^b	7.43 ^c
EDTA _{0.05M}	—	—	—	—	—
LSD _{0.05}	10.4	0.04	0.55	0.17	3.21

註：同表五

表七、重金屬高含量地區土壤中0.1M鹽酸溶出鎘鉻銅鎳鉛及鋅濃度(水口3公尺)

編號	深度 cm	mg/kg					
		鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅
HB301	0-5	3.56	40.4	281	117	30.2	228
HB302	5-10	3.51	46.8	239	96.1	31.7	203
HB303	10-15	3.40	42.9	201	72.0	30.8	160
HB304	15-20	0.68	3.86	19.7	7.73	11.1	18.3
HB305	20-30	0.16	0.50	3.74	2.73	5.02	8.04
HB306	30-40	0.18	0.54	3.70	2.84	4.31	9.12
HB307	40-50	0.15	0.50	4.91	3.31	3.87	9.18
HB308	50-70	0.17	0.51	5.19	4.38	4.69	8.18
HB309	70-90	0.13	0.49	5.00	3.51	5.13	7.20
HB310	90-110	0.15	0.17	5.25	3.17	6.89	7.18
HB311	110-130	0.17	0.52	6.74	2.80	8.54	6.84
HB312	130-150	0.15	0.30	6.32	1.77	8.27	5.34
HB313	150-170	0.16	0.29	4.88	1.28	6.09	4.49
HB314	170-200	0.10	0.26	1.97	0.70	2.91	4.01
HB315	200-230	0.10	0.22	2.08	0.74	2.64	4.02
HB316	230-260	0.11	0.49	3.22	1.43	2.72	4.49
HB317	260-290	0.19	0.26	4.23	0.72	6.40	5.68
HB318	290-320	0.07	0.14	1.77	0.51	2.69	2.92
HB319	320-350	0.07	0.16	2.40	0.89	3.05	3.69
HB320	350-383	0.15	0.07	2.88	1.02	4.27	3.03

[例三]栽培非食用作物

彰化地區受工業廢水污染的農地為數不少，和美某農田水口3公尺深挖土壤至3公尺8（地下水位），每隔5公分採一土樣中0.1 M鹽酸抽取的鎘、鉻、銅、鎳、鉛及鋅如表七，重金屬聚集於耕犁層（表土）。栽培非食用作物可避免重金屬移入食物鏈，在此區栽培觀音棕竹、樹蘭、黃金榕、巴西鐵樹、馬來巴

栗、鳳仙、唐葛蒲、海棠及菊花等觀賞花木，可吸收部分重金屬如表八，考量吸收量，生長及經濟價值等因素後推薦鳳仙花、海棠和菊花等。例一花壇農地曾栽培木槿等16種苗木及2種草皮用草，葉片重金屬濃度如表九，試種花木成活生長均佳，多種花木且不聚積重金屬，經濟收益較種水稻為佳，是為「農地農用」的好策略。

表八、各種植物全株重金屬平均含量 (mg/kg)

植物種類	鎘	鋅	銅	鉛	鎘	鎳
觀音棕竹	35.1	45.6	22.0	3.86	0.35	30.1
樹蘭	19.3	35.6	21.8	3.86	0.99	30.4
黃金榕	14.5	30.6	17.8	3.27	0.49	22.9
巴西鐵樹	12.7	35.7	13.1	15.1	0.78	25.2
馬拉巴栗	26.4	33.5	17.8	12.9	0.59	35.0
非洲鳳仙	51.5	148	25.7	11.0	6.66	48.8
唐葛蒲	25.4	35.4	13.9	4.61	5.06	23.2
四季海棠	41.1	58.4	20.7	18.6	4.55	46.7
菊花葉片	27.1	65.8	17.3	23.3	5.43	27.1

表九、各種苗木葉片中重金屬濃度^{a)} (mg/kg)

種類	鎘		鉻		銅		鎳		鉛		鋅	
	試驗	對照 ^{b)}	試驗	對照	試驗	對照	試驗	對照	試驗	對照	試驗	對照
木槿	4.30	ND	ND ^{c)}	ND	5.55	6.85	25.7	2.10	ND	1.40	29.4	29.8
樟樹	3.00	ND	ND	ND	8.95	8.10	25.3	8.10	ND	1.10	20.8	44.5
鵝掌藤	2.50	ND	ND	ND	3.65	5.65	4.35	2.55	ND	7.65	60.4	19.5
黑板樹	0.75	ND	ND	ND	8.70	8.95	11.7	2.95	ND	ND	18.7	6.20
台北草	0.70	ND	90.2	8.18	19.3	6.73	28.0	1.90	4.65	1.60	55.3	10.9
桂花	0.45	ND	ND	ND	5.25	6.60	4.60	ND	ND	1.20	7.60	41.2
榆樹	0.45	ND	ND	ND	15.1	4.55	34.3	1.10	ND	0.35	40.0	28.2
紅莧	0.40	ND	ND	ND	6.40	10.7	22.0	1.90	ND	2.05	19.7	17.1
黃金扁柏	0.15	ND	1.55	ND	6.95	9.85	32.3	2.45	ND	1.25	14.4	29.3
變葉木	ND	ND	ND	ND	9.25	6.20	2.15	2.60	0.45	ND	39.0	22.4
黃椰子	ND	ND	4.70	1.75	8.10	5.85	4.10	3.15	ND	ND	18.5	18.5
朱蕉	ND	ND	1.50	ND	9.15	10.0	8.05	9.20	1.35	1.65	14.2	34.4
仙丹	ND	ND	0.60	ND	1.11	10.9	75.5	2.50	1.25	0.20	31.2	24.3
斑葉榕	ND	ND	ND	ND	5.40	6.05	8.20	2.60	ND	1.70	7.15	11.7
福木	ND	ND	ND	ND	3.35	3.10	0.65	1.65	ND	ND	11.6	6.35
七里香	ND	ND	ND	ND	9.70	9.60	5.80	ND	ND	1.05	23.1	11.0
韓國草	ND	ND	31.8	5.20	8.35	8.00	7.55	2.75	ND	0.30	19.1	13.4
馬拉巴栗	ND	ND	ND	ND	5.40	7.10	16.6	3.60	ND	ND	22.8	9.90

^{a)} mg/kg, 以乾重為基準

^{b)} 採自田尾花卉苗木生產專業區

^{c)} ND表示檢測不到; 鎳之最低檢測界限為0.30mg/kg, 鉛之最低檢測界限為0.30mg/kg

四、結言

經過細密的調查，了解土壤的特性，污染物的種類、濃度及分佈情形，可行的整治

方法及民眾接受度等進行評估，選出合宜的整治方法，才能把污染的土壤做適當的整治。