

<p>3. 計畫執行良好，文獻及方法說明具體詳盡，整體研究成果符合預期。</p>	<p>3. 謝謝委員的指教與肯定。</p>
<p>委員三： 未參與審查作業。</p>	
<p>委員四：</p> <p>1. 期末報告格式均依規定撰寫，符合規定。</p> <p>2. 研究項目及進度符合計畫內容，已達到計畫目標。</p> <p>3. 初步成果已達預期。已連續執行三年現地重金屬污染之植生復育試驗，結論為試驗植物從土壤中吸收移除之各種重金屬量仍偏低，已取得數據與經驗。</p>	<p>1. 謝謝委員的指教與肯定。</p> <p>2. 謝謝委員的指教與肯定。</p> <p>3. 謝謝委員的指教與肯定。由於植物的吸收行為屬緩慢而持續之生理現象，加以本場址之污染相當嚴重，故復育植物對重金屬的吸收移除量佔總污染量之比例偏低。不過，研究結果亦顯示，移除量明顯隨著植物生長而逐年提高。</p>
<p>委員五：</p> <p>1. 本研究屬於模場研究，研究內容&討論與建議仍屬初期的討論(因需長期觀察)，就研究成果的實務應用性而言，仍未具有實務可行性。</p> <p>2. 國內其他試驗性場址的成果亦顯示，類似的研究需長期觀察，但有極大的不確定性。P. 92第四點的論點仍需有更完整的資料佐證，且目前的改善成效(已執行三年)與整治目標間的關係建議評估，尤其是長期操作的情境下是否仍具有”綠色”的價值？長期的觀察與其他操作維護的總碳排，是否就真的比較”綠色”？</p>	<p>1. 謝謝委員指教。誠如委員所指，生物與植生復育須時較長，就本計畫初步成果觀之，所進行的植生與生物復育雖有降低污染物效果，但若要達到整治目標，確實無法在短期內竟其功。</p> <p>2. 謝謝委員指教。如上所述，生物與植生復育須時較長，故而僅以本計畫所試行的方法，若要在本高污染場址達到整治目標，確實無法在短期內竟其功。不過，若因本工法之採行而未使用其他高耗能之整治方法，且所栽種之復育植物具有吸收二氧化碳之效益，故若僅以短期「碳排」論之，確有「綠色」效果。惟因復育期可能長達百年以上，若加上時間成本及其他因素，其「綠色」效果仍待斟酌。</p>

<p>3. 操作維護成本建議評估。</p>	<p>3. 謝謝委員指教。本計畫未來若持續進行，在不採樣分析前提下，其操作維護費用估計每年約需 290,000 元，包括水電及設施維護費 30,000 元，植栽管理費用(含平日澆水與病蟲害防治及施肥)90,000 元，復育生物施放費(分解菌及蚯蚓各三次)90,000 元，植物修剪及處理費(四次)80,000 元。此部分已於本文 p.92 補充說明。</p>
<p>4. 計畫執行進度與預定進度相符。</p>	<p>4. 謝謝委員的指教與肯定。</p>
<p>5. 進度並無落後。</p>	<p>5. 謝謝委員。</p>
<p>6. 執行現況、研究流程及方法說明具體。</p>	<p>6. 謝謝委員的指教與肯定。</p>
<p>本署意見：</p> <p>1 無意見。</p>	<p>1. 謝謝。</p>

專案基本資料表

專案性質		<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案類別(單選)		<input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗		
研究主題		<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥						
申請機構系所		大仁科技大學環境與職業安全衛生系						
機構地址		屏東縣鹽埔鄉維新路 20 號						
計畫主持人		李芳胤		職等／職稱		大仁科技大學環安系教授		
協同主持人		許正一		職等／職稱		屏東科技大學環工系教授		
協同主持人		賴文亮		職等／職稱		大仁科技大學環安系教授		
協同主持人		郭耀綸		職等／職稱		屏東科技大學森林系教授		
專案名稱	中文	綠色整治廢機油污染場址之管理與效益評估						
	英文	Management and performance assessment of a green remediation site contaminated by used motor oil						
	關鍵字	廢機油、綠色整治、復育樹種						
執行期程		自民國 103 年 12 月 1 日起 至民國 104 年 11 月 30 日止						
計畫主持人		姓名：李芳胤 Email：ky32829@gmail.com				專線：(08)7624004-2709 手機：0931955102		
專任助理		姓名： Email：				專線： 手機：		
計畫經費概算		專 案 預 估 經 費		金 額		編列說明		
		1.	人事費用		447,000		(1~5 項相加之 50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費		0		(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用		443,000		(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用		0		(差旅與租賃費用)	
		5.	雜支費用		20,000		(1~6 項相加之 5%為限)	
		6.	行政管理費		90,000		(1~5 項相加之 10%為限)	
		專案計畫申請總金額		1,000,000				

專案主持人(簽名及蓋章)：_____

日期：_____

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

104 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：104 年 10 月 17 日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥		
申請機構系所	環境與職業安全衛生系	計畫主持人	李芳胤
專案名稱	綠色整治廢機油污染場址之管理與效益評估		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術產 出發表日期、發表處、發表 名稱、影響指數等)
A 學術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	1	1			
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1		1		
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術						
	(2)技術平台						
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士					
		(2)博士					
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1	1			
		(2)跨國團隊					
		(3)跨機構團隊					
		(4)形成研究中心					
		(5)形成實驗室					
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、 技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申請中	發明					
			新型/設計					
			合計					
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	3.技術移轉 (專利)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	4.技術移轉 (應用技術)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金(仟元)						
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)						
		(2)品種/系(件數)						
6.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						

(三) 政策面

項目 \ 目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
	B 支 援 合 作	3.協助政府制 定 (件數)	(1)政策				
(2)法規							
(3)規範							
(4)標準							
4.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500 字為限）

本計畫之性質為模場試驗，使用之污染整治場址位於屏東縣九如鄉，因污染行為人於場址中從事廢機油處理作業而導致土壤遭受銅、鉻、鋅、鎳及總石油碳氫化合物污染 (TPH)。本計畫係以綠色整治方式，包括生物與植生復育法進行試驗，藉以達到改善污染之目的。研究團隊在場址內共設置六個試驗區，其中五個為位於污染區域之復育區，另外於無污染區域設置一個對照區，且分別栽植復育植物，包括深根性之白楊、構樹、血桐與淺根性之太陽麻，並於生物復育區施放蚯蚓及石化分解菌，然後定期採集土壤樣品分析 TPH 及重金屬含量，以觀察污染物濃度變化；採集植體樣品分析重金屬濃度，再配合移除植體之重量估算重金屬之移除量。

經過三年餘之試驗，蚯蚓之計量調查結果發現，施放之蚯蚓生長狀況良好，對 TPH 發揮降解效果，以致各復育區之土壤 TPH 濃度雖因土壤之非均質性而呈現不規則變化，但多呈降低趨勢。植物生育調查結果亦顯示，白楊、構樹、血桐及太陽麻在試驗區中發育良好，木本植物之生理試驗結果則指出，除在 PR2 出現生理逆境徵狀外，多數已能適應污染環境，而植體之重金屬測值也指出，所有復育植物對土壤中之重金屬都有吸收、累積與移除效果。整體而言，所有復育生物均可忍受試驗場址環境並產生復育效益，有益於後續之污染場址改善工作。此外，本年度也將場址優勢草種牛筋草納入評析對象，結果發現其生質量與重金屬含量皆高於太陽麻，復育效果可達 11.3 倍，為甚佳之淺層土壤重金屬復育植物。

本計畫之執行，除產生上述污染改善之技術效益外，由於本污染場址屬縣政府公有地，因污染行為人之非法佔用與不當行為所造成之環境污染，包括煉油作業產生之煙霧與臭味，廢棄物、廢油桶、廢油與雜草衍生之髒亂，地下水污染之疑慮等困擾居民之問題，皆因本計畫之執行而獲致解決與改善，故而兼具經濟與社會影響效益。

行政院環境保護署

104 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案工作

綠色整治廢機油污染場址之 管理與效益評估

期末報告(定稿)

執行期間：103 年 12 月 1 日起至 104 年 11 月 30 日

執行單位：大仁科技大學

計畫經費：新台幣 100 萬元整

計畫主持人：李芳胤

計畫協同主持人：賴文亮、許正一、郭耀綸

研究人員：陳義和、張寶松、林維新、黃瀚賢、林川修、劉俊偉、林育德、

李明杰、林鑫平、張俊傑、廖偉志

計畫摘要

本計畫場址位於屏東縣九如鄉，主要污染物為鋅、鉻、銅、鎳及總石油碳氫化合物（TPH）。計畫自101年起執行迄今，主要目的在於以生物復育法(蚯蚓與石化分解菌)與植生復育法(白楊、構樹、血桐、太陽麻與牛筋草)改善污染。在場址內共設置六個試驗區，除對照區外，另設有三個生物復育區與二個為植生復育區。在三年餘的試驗後發現，各復育區之TPH濃度多呈現降低趨勢，三個生物復育區土壤中之TPH濃度減量百分比介於33%~97%，植生復育區則為19%~81%；而重金屬之測值指出，各復育區同一土層之濃度呈現無規則變化，不過，多數土層中之污染物濃度仍高於土壤污染管制標準。其次，生理試驗結果顯示，除白楊因正值落葉期以致光合潛力較差外，其餘植物已能適應污染環境。此外，本年度進行之木本及草本植體重金屬測值顯示，所有復育植物都具吸收累積效果，其吸收量依序為 $Zn > Cu > Cr > Ni$ 。最後以所有復育植物修剪或收成植體之生質量與重金屬濃度計算其吸收移除量，藉以評析植生復育效益，結果發現總移除量為 $Zn (618.1\text{ g}) > Cu (12.07\text{ g}) > Cr (11.39\text{ g}) > Ni (10.07\text{ g})$ 。至於復育植物對重金屬之移除能力，木本植物依序為白楊>血桐>構樹，而草本植物則為牛筋草>太陽麻。

Abstract

The contaminated site proposed in this study is located at Jiuru Township, Pingtung County, with an area of 1,800 m². According to previous investigations, the major contaminants in soils were found to be zinc, chromium, copper, nickel and total petroleum hydrocarbon (TPH). The objective of this research project is to conduct remediation in the contaminated site. Five treatment plots were designated in the highly contaminated area, in which three were designed for bio-phytoremediation (BP1, BP2, and BP3) and two for phytoremediation practice (PR1 and PR2). One control plot was used for comparison purposes. Since the initiation of this study in 2012, earthworm (*E. fetida*) and petroleum-degrading bacteria (*Pseudomonas sp.* NKNU01) have been utilized for bioremediation, while Poplars (*Populus bonatii* Levl.) and Sun Hemp (*Crotalaria juncea* L.) in the phytoremediation practice. Selective native plants, namely Macaranga (*Macaranga tanarius*) and Papermulberry (*Broussonetia papyrifera*) have also been planted to evaluate their remedial capabilities in 2014, while a dominant weed Eleusine indica was chosen for the same evaluation this year. The results of soil analysis showed a trend of decreasing TPH concentrations in most treatment plots, and the removal rate of TPH within the three bio-phytoremediation plots ranged from 33%~97% and from 19%~81% in the two phytoremediation plots. However, heavy metal concentrations were not significantly reduced and thus most soils were still highly contaminated. Plant growth and physiological investigations indicated that Poplars, Papermulberry and Macaranga were adaptable to the pollutants. For the purpose of further explorations, biomass and heavy-metal contents of the studied plants were analyzed to evaluate the removal efficiency of heavy metals. The results indicated that the four metals were absorbed and removed by all studied plants in the order of Zn (618.1 g) > Cu (12.07 g) > Cr (11.39 g) > Ni (10.07 g) .The heavy-metal removal ability of the woody plants was found to be Poplars > Macaranga > Papermulberry and Eleusine indica > Sun Hemp for the herbaceous plants.

目錄

第一章 前言與研究目的	1
1.1 計畫緣起	1
一、計畫場址地理位置	1
二、計畫場址污染稽查與查證歷程	2
三、改善計畫書提報、改善歷程及驗證結果	3
四、土壤污染控制場址及管制區公告歷程	4
五、整治場址公告歷程	4
六、調整公告範圍歷程	8
1.2 計畫目的	9
1.3 工作項目	10
1.4 執行經費	11
1.5 章節摘要	11
第二章 文獻探討.....	12
2.1 石油碳氫化合物之生物復育	12
2.2 蚯蚓復育污染土壤.....	15
2.3 植生復育.....	17
2.4 章節摘要	22
第三章 研究方法與過程	23
3.1 試驗區規劃.....	23
3.2 試驗區管理.....	24
一、澆水	24
二、除草	24

三、施肥與病蟲害防治	24
3.3 生物復育試驗施作	24
一、選擇蚯蚓物種	24
二、蚯蚓分類與培育	25
三、蚯蚓之施放	25
四、石化分解菌施用	25
3.4 植生復育試驗施作	28
一、樹種選擇	28
二、植栽規劃	29
3.5 土樣採集與分析	30
3.6 植物生理調查與採樣分析	31
一、生育調查	31
二、生理調查	31
三、植體採樣分析	32
3.7 復育生物計量調查	32
一、蚯蚓計量調查	32
二、石化分解菌計量調查	32
3.8 復育效益評析	33
一、植物適應與復育成效評析	33
二、生物復育成效評析	33
3.9 預期完成之工作項目與進度	34
3.10 污染防治及場址安全措施	35
一、安全衛生管理計畫	35

二、緊急應變計畫.....	36
三、二次污染防治計畫.....	37
3.11 章節摘要.....	37
第四章 結果與討論	39
4.1 試驗區管理	39
一、澆水.....	39
二、除草.....	39
三、施肥與病蟲害防治.....	39
4.2 生物復育試驗施作	40
4.3 植生復育試驗施作	42
4.4 土樣採集與分析	45
一、土壤 TPH 分析結果	45
二、土壤重金屬分析結果.....	51
三、土壤性質及重金屬型態分析結果.....	65
4.5 植物生理調查與採樣分析	66
一、生育調查成果.....	67
(一)白楊生育調查成果	67
(二)構樹與血桐生育調查成果	69
(三)太陽麻生育調查成果	70
二、生理試驗.....	71
(一)復育樹種淨光合作用率測定結果	71
(二)復育樹種葉綠素螢光 F_v/F_m 值測定結果	73
三、植體重金屬分析成果.....	75

4.6 土壤與植體重金屬含量之關係	78
4.7 復育效益評析	84
一、復育生物適應性評估	84
二、TPH 改善效益評析	85
三、重金屬改善效益評析	86
(一)草本植物之重金屬吸收移除量	86
(二)木本植物之重金屬移除量	88
(三)復育植物之重金屬總移除量	90
(四)復育植物之單顆(株)重金屬移除量	91
(五)操作維護成本	92
四、植生與生物復育法在本場址應用性評析	92
4.8 章節摘要	93
一、試驗區管理	93
二、生物復育試驗施作	93
三、植生復育試驗施作	93
四、土樣採集與分析	93
五、植物生理調查與草本植體分析	93
六、復育效益評析	94
(一)復育生物之適用性評析	94
(二)TPH 降解效果評析	94
(三)草本植物重金屬移除效果評析	94
第五章 後續工作重點	95
參考文獻	96

- 附錄 1 草本植物重金屬檢測品保數據
- 附錄 2 土壤質地及重金屬檢測品保數據
- 附錄 3 土壤可萃取性重金屬檢測品保數據
- 附錄 4 土壤重金屬檢測品保數據
- 附錄 5 土壤 TPH 檢測品保數據

圖目錄

圖 1-1 計畫場址地理位置、範圍及歷次土壤採樣點分佈圖.....	1
圖 1-2 污染行為人作業現場及污染概況圖.....	2
圖 1-3 環保署補充調查簡易井位置示意圖.....	6
圖 2-1 兩種試驗蚯蚓之外觀.....	17
圖 2-2 植物分解作用-A 為植物酵素作用，B 為光合作用.....	19
圖 2-3 根系土壤分解.....	19
圖 2-4 植物揮發作用.....	20
圖 2-5 植生萃取作用.....	20
圖 2-6 植物穩定化作用.....	21
圖 3-1 試驗區與土壤採樣點配置圖.....	23
圖 3-2 生物復育所使用紅蚯蚓(<i>Eisenia fetida</i>).....	25
圖 3-3 生物反應槽-攪拌式生物反應槽 (Stirred Tank Bioreactor).....	27
圖 3-4 石化分解菌施灑區塊(綠色區塊 BP1、BP2 及 BP3).....	27
圖 3-5 白楊(上左)、構樹(上中)、血桐(上右)、太陽麻(下左)、田青(下右)....	29
圖 4-1 生物復育區施放蚯蚓(上)及計量調查(下)作業.....	41
圖 4-2 血桐(左)與構樹(右)之生長狀況.....	42
圖 4-3 白楊之生長狀況.....	43
圖 4-4 收成之太陽麻(上)與牛筋草(下).....	45
圖 4-5 生物復育區 BP1 之 TPH 濃度變化.....	48
圖 4-6 生物復育區 BP2 之 TPH 濃度變化.....	48
圖 4-7 生物復育區 BP3 之 TPH 濃度變化.....	49

圖 4-8 植生復育區 PR1 之 TPH 濃度變化.....	49
圖 4-9 植生復育區 PR2 之 TPH 濃度變化.....	50
圖 4-10 各試驗區六次土壤重金屬濃度平均值變化趨勢.....	65
圖 4-11 102 年風災倒伏植株與枝葉修剪作業.....	68
圖 4-12 103 年風災倒伏植株與枝葉修剪作業.....	68
圖 4-13 104 年風災倒伏植株與枝葉修剪作業.....	69

表目錄

表 1-1 稽查採樣檢測結果 (2.22.2008).....	3
表 1-2 改善驗證土壤重金屬檢測結果(3.10.2009)	3
表 1-3 改善驗證土壤總石油碳氫化合物檢測結果(3.10.2009)	4
表 1-4 環保署補充調查土壤重金屬檢測結果(10.16.2009)	5
表 1-5 環保署補充調查土壤 TPH 檢測結果(10.16.2009)	5
表 1-6 環保署補充調查地下水重金屬檢測結果.....	7
表 1-7 環保局補充調查地下水 TPH 檢測結果.....	7
表 1-8 環保局補充調查土壤檢測結果(05.12.2011)	8
表 3-1 計畫工作項目與執行期程甘特圖	34
表 4-1 各試驗區土壤水分含量.....	40
表 4-2 試驗區土壤總石油碳氫化合物監測結果.....	47
表 4-3 101 年 5 月各試驗區土壤重金屬分析結果.....	52
表 4-4 102 年 2 月各試驗區土壤重金屬分析結果.....	54
表 4-5 102 年 8 月各試驗區土壤重金屬分析結果.....	56
表 4-6 102 年 12 月各試驗區土壤重金屬分析結果.....	58
表 4-7 103 年 7 月各試驗區土壤重金屬分析結果.....	60
表 4-8 104 年 7 月各試驗區土壤重金屬分析結果.....	62
表 4-9 各試驗區六次土壤重金屬濃度平均值.....	63
表 4-10 土壤物化性質	66
表 4-11 0.01M CaCl ₂ 可萃取重金屬分析結果.....	66

表 4-12 白楊生育調查平均值彙整表.....	67
表 4-13 血桐生育調查結果.....	70
表 4-14 構樹生育調查結果.....	70
表 4-15 太陽麻生育調查結果.....	71
表 4-16 血桐淨光合作用率測定結果.....	72
表 4-17 構樹淨光合作用率測定結果.....	72
表 4-18 白楊淨光合作用率測定結果.....	73
表 4-19 血桐葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益.....	74
表 4-20 構樹葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益.....	74
表 4-21 白楊葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益.....	75
表 4-22 太陽麻植體之重金屬含量.....	76
表 4-23 牛筋草植體之重金屬含量.....	77
表 4-24 各復育區木本植物重金屬含量平均值.....	77
表 4-25 土壤與植體重金屬含量分析結果.....	79
表 4-26 土壤與植體重金屬含量之相關係數(r).....	84
表 4-27 各復育區草本植物乾重.....	86
表 4-28 太陽麻之重金屬移除量.....	87
表 4-29 牛筋草之重金屬移除量.....	87
表 4-30 草本植物之重金屬移除量.....	88
表 4-31 白楊剪除枝葉之乾重與重金屬移除量.....	88
表 4-32 血桐剪除枝葉之乾重與重金屬移除量.....	89
表 4-33 構樹剪除枝葉之乾重與重金屬移除量.....	89
表 4-34 全年木本植物之重金屬移除量.....	89

表 4-35 全年復育植物之重金屬總移除量.....	90
----------------------------	----

表 4-36 復育樹種之重金屬單位移除量.....	91
---------------------------	----

報告大綱

章節	內容概述	頁次
第一章 前言與研究目的	<p>1.1 計畫緣起：說明計畫場址地理位置、計畫場址污染稽查與查證歷程、改善計畫書提報、改善歷程及驗證結果、土壤污染控制場址及管制區公告歷程、整治場址公告歷程、調整公告範圍歷程。</p> <p>1.2 計畫目的：說明本計畫以生物與植生復育法整治污染場址之目的。</p> <p>1.3 工作項目：說明本計畫試驗區管理、生物復育試驗施作、植生復育試驗施作、土樣採集與分析、植物生理調查與採樣分析、復育效益評析等工作項目及其內容。</p> <p>1.4 執行經費：說明執行經費。</p> <p>1.5 章節摘要：簡要陳述本章之內容。</p>	<p>1</p> <p>9</p> <p>10</p> <p>11</p> <p>11</p>
第二章 文獻探討	<p>2.1 石油碳氫化合物之生物復育：介紹各種石油碳氫化合物之生物復育方法。</p> <p>2.2 蚯蚓復育污染土壤：介紹蚯蚓種類與復育污染土壤之研究成果。</p> <p>2.3 植生復育：介紹植生復育之原理與研究成果。</p> <p>2.4 章節摘要：簡要陳述本章之內容。</p>	<p>12</p> <p>14</p> <p>17</p> <p>21</p>
第三章 研究方法與過程	<p>3.1 試驗區規劃：說明六個試驗區之為致與功能。</p> <p>3.2 試驗區管理：介紹澆水、除草、施肥與病蟲害防治方法。</p> <p>3.3 生物復育試驗施作：介紹蚯蚓物種之選擇、蚯蚓分類與培育、蚯蚓與石化分解菌施用方法。</p> <p>3.4 植生復育試驗施作：介紹樹種選擇與植栽規劃原則。</p> <p>3.5 土壤採集與分析：介紹土壤採集與分析方法。</p> <p>3.6 植物生理調查與採樣分析：說明生育調查、生理調查、植體採樣分析方法。</p> <p>3.7 復育生物計量調查：說明蚯蚓與石化分解菌計量調查方法，蚯蚓計量調查結果。</p> <p>3.8 復育效益評析：說明植物適應性與復育成效評析、生物復育成效評析方法。</p> <p>3.9 預期完成之工作項目與進度：以甘特圖說明工作項目與進度。</p>	<p>23</p> <p>24</p> <p>24</p> <p>28</p> <p>30</p> <p>31</p> <p>32</p> <p>33</p> <p>34</p>

報告大綱(續)

章節	內容概述	頁次
第三章 研究方法與過程	3.10 污染防治及場址安全措施：說明環境與安全維護之內容。	35
	3.11 章節摘要：簡要陳述本章之內容。	37
第四章 結果與討論	4.1 試驗區管理：說明澆水、除草、施肥與病蟲害防治之執行方法、內容與成果。	39
	4.2 生物復育試驗施作：說明蚯蚓與生化分解菌施放之執行方法、內容與成果。	40
	4.3 植生復育試驗施作：說明白楊、血桐、構樹、太陽麻栽種、管理與收成之執行方法、內容與成果。	42
	4.4 土樣採集與分析：說明土壤採集之執行方法，TPH與重金屬之分析結果。	45
	4.5 植物生理調查與採樣分析：說明白楊、血桐、構樹、太陽麻與牛筋草生育調查、生理試驗與植體重金屬分析成果。	66
	4.6 土壤與植體重金屬含量之關係：說明本年度採樣方式及土壤與植體重金屬含量之關係。	78
	4.7 復育效益評析：說明復育生物適應性、TPH改善效益及重金屬改善效益。	84
	4.8 章節摘要：簡要陳述本章之內容。	93
第五章 後續工作重點	簡要陳述本計畫後續之工作重點。	96
參考文獻	列出本計畫所有參考文獻。	97
品管資料	列出土壤質地及重金屬、植體重金屬檢測品保數據	

第一章、前言與研究目的

1.1 計畫緣起

本計畫之試驗土地為位於屏東縣之公告土壤污染整治場址，污染物為鉻、鋅及總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbon, TPH)。污染緣由乃污染行為人長期於場址內以簡陋設施非法從事廢機油提煉與回收處理作業，因無污染防護措施，以致廢原料油或提煉製程之廢液因溢漏、漫流或任意倒置而殘留於場址土地上，造成土壤污染。

一、計畫場址地理位置

本計畫場址位於屏東縣九如鄉大坵村，地號為九清段 1340 地號，總面積 27,550 平方公尺，公告整治場址範圍為 1,800 平方公尺，乃屏東縣政府民政局所屬之殯葬用地(圖 1-1)。

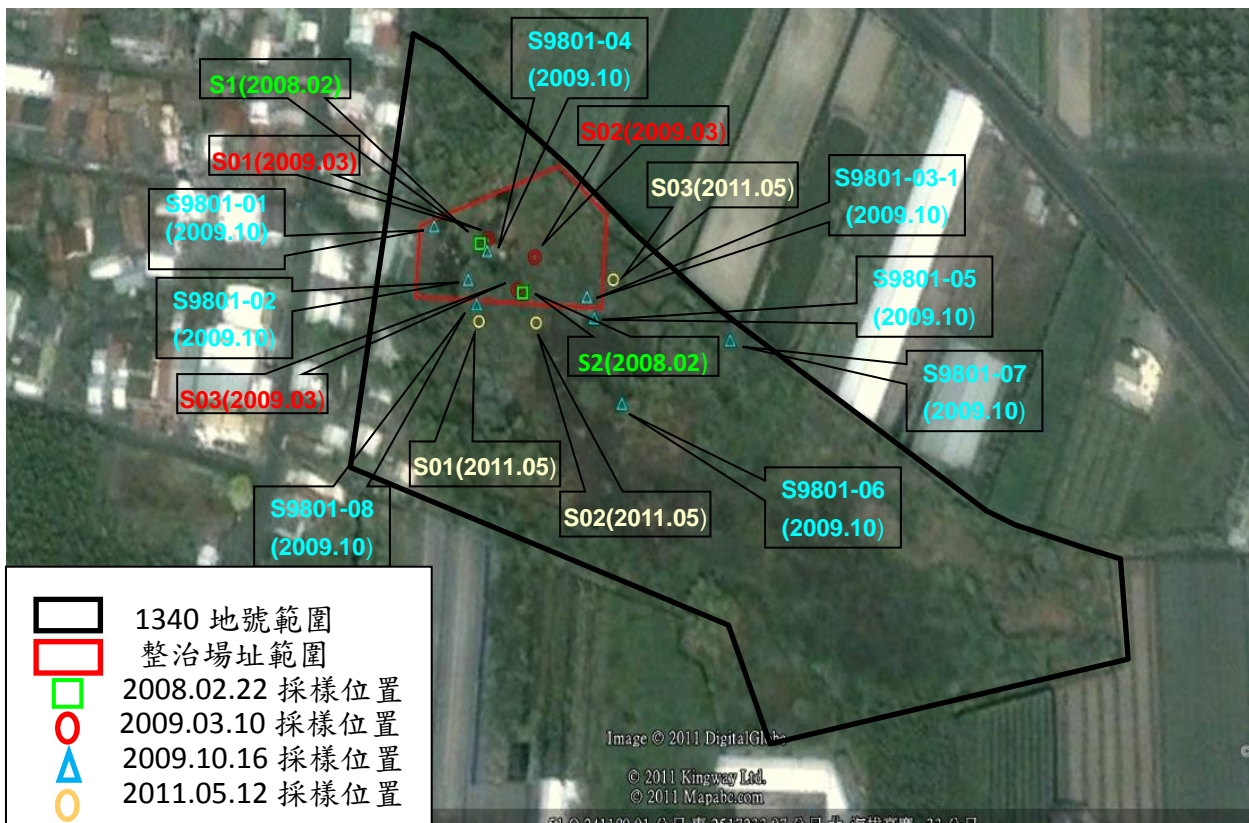


圖 1-1 計畫場址地理位置、範圍及歷次土壤採樣點分佈圖

二、計畫場址污染稽查與查證歷程

2008 年 1 月屏東縣政府環保局接獲民眾之污染陳情，遂於當月 21 日會同相關單位赴該場址稽查，發現污染行為人陳福長於場址內搭設簡陋工寮從事廢機油提煉與回收處理作業，作業場所不但露天堆置數十個 50 加崙的鐵桶，且因無污染防護措施，以致廢原料油或提煉製程之廢液因溢漏、漫流或任意倒置而殘留於場址土地上，有污染土壤與地下水之虞（圖 1-2）。

稽查人員除依法禁止其污染行為並採取必要應變措施外，水污科並於 22 日會同污染行為人及相關單位進場於廢油桶堆置區(S1, 0-15 cm)及鄰近之草叢廢液傾倒區(S2, 0-5 cm、5-20 cm、20-40 cm)採集 4 個土壤樣品，分析重金屬（鉛、銅、鉻、鋅、鎳、鎳）及揮發性有機物(VOCs)，採樣點分佈如圖 1-1，檢測結果則列於表 1-1。由表中數據顯示，銅、鉻、鋅、鎳及總石油碳氫化合物（TPH）超過土壤污染管制標準。環保局遂於 2008 年 4 月 2 日行文給陳福長先生，告知依據土壤及地下水污染整治法第十一條規定該地號為土壤污染場址，要求其提出改善措施，以減輕污染影響或避免污染擴大。



圖 1-2 污染行為人作業現場及污染概況圖

表 1-1 稽查採樣檢測結果 (2008.2.22)

採樣點	深度 (cm)	鉛	銅	鉻	鋅	鎳	鎘	TPH _g	TPH _d	TPH
		mg/kg								
S1	0-15	295	586	711	51800	555	2.78	100	110000	110000
S2	0-5	41.0	88.0	129	44200	105	0.58	958	68100	69100
	5-20	41.4	42.7	47.6	1180	56.0	ND	43.0	27600	27600
	20-40	36.6	33.9	38.6	624	51.3	0.58	46.7	24400	24400
土壤污染 管制標準		2000	400	250	2000	200	20			1000

註：超過管制標準者以粗體底線表示。

三、改善計畫書提報、改善歷程及驗證結果

污染行為人於 2008 年 6 月 30 日提出自行改善計畫書，同年 7 月 7 日經環保局審查通過，整治方法為移除與翻轉稀釋，期限為 2008 年 7 月 1 日至 2009 年 3 月 1 日。在限期後(2009 年 3 月 10 日)環保局遂針對場址改善成果進行驗證，現場採集 3 個樣點（圖 1-1，編號 S01～S03），檢測結果（表 1-2 及 1-3）發現重金屬（鉻、鋅）及 TPH 仍超過管制標準，因此即依法規進行後續公告程序。

表 1-2 改善驗證土壤重金屬檢測結果(2009.3.10)

採樣點	深度 (cm)	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅
		mg/kg					
S01	0-45	0.15	282	152	131	49.7	8300
S02	30-60	ND	78.8	47.6	77.6	26.8	2750
S03	30-60	ND	75.1	70.7	55.1	33.3	2350
土壤污染管制標準		20	250	400	200	2000	2000

註：超過管制標準部分以粗體底線表示。

表 1-3 改善驗證土壤總石油碳氫化合物檢測結果(2009.3.10)

點位編號	採樣深度(cm)	檢測項目	檢測值(mg/kg)
S01	20-45	TPH _g	805
		TPH _d	<u>123000</u>
S02	30-50	TPH _g	173
		TPH _d	<u>59900</u>
	110-130	TPH _g	<10
		TPH _d	<u>1530</u>
S03	30-50	TPH _g	<10
		TPH _d	<50
土壤污染管制標準			1000

註：超過管制標準部分以**粗體底線**表示。

四、土壤污染控制場址及管制區公告歷程

由於驗證結果顯示自行改善未達預定目標，故環保局基於權責依法於 2009 年 6 月 1 日公告屏東縣九如鄉九清段 1340 地號為土壤污染控制場址，場址面積為 27,550 平方公尺，污染物為土壤中之重金屬鉻、鋅及總石油碳氫化合物。其後並於 2009 年 6 月 25 日公告為土壤污染管制區，依土壤及地下水污染管制區管制辦法予管制或限制管制區內之土壤使用或人為活動。

五、整治場址公告歷程

由於公告之土壤污染控制場址面積達 27,550 平方公尺，環保署為釐清明確之污染範圍，經環保局請求協助後，乃於 2009 年 10 月 16 日以緊急應變方式進行補充調查。於場址內共採集 9 組土壤樣品（圖 1-1，編號 S9801-01~S9801-08）；並於高污染潛勢區設置 3 口簡易井（圖 1-3，編號 TW-9801-1~TW-9801-3），採集地下水樣品，另於場址西側下游採集 3 組民井地下水樣品進行分析。

土壤檢測結果如表 1-4 與表 1-5 所示，其中採樣點編號 S9801-02、S9801-03-1 及 S9801-04 之鋅濃度，編號 S9801-04 之鉻及鎳濃度皆超過管制標準。編號 S9801-02、S9801-03-1 及 S9801-04 之總石油碳氫化合物濃度也都超過污染管制標準。研判污染範圍為 1,800 平方公尺。至於地下水調查結果（表 1-6 與表 1-7）則皆未達第二類地下水管制標準，可見此區地下水尚未嚴重污染。依據此結果，環保署於 2010 年 5 月 4 日開會議決公告本場址為土壤污染整治場址，面積為 1800 平方公尺。

表 1-4 環保署補充調查土壤重金屬檢測結果(2009.10.16)

採樣點	深度 (cm)	砷	汞	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅
		mg/kg							
S9801-01	100-130	6.81	0.04	ND	29.0	19.7	29.4	20.4	228
S9801-02	150-180	16.4	0.099	0.30	60.9	204	52.7	45.1	4600
	200-230	5.13	ND	ND	20.6	17.9	28.8	23.	257
S9801-03-01	100-130	13.5	0.114	0.41	232	195	179	47.3	9250
S9801-04	0-15	23.5	0.106	0.69	566	361	288	76.7	18100
S9801-05	50-80	7.85	0.064	ND	23.5	20.6	29.9	22.7	122
S9801-06	50-80	7.86	0.079	ND	23.3	19.8	28.1	26.4	112
S9801-07	0-15	9.85	0.052	ND	27.6	28.9	33.4	31.0	122
S9801-08	0-30	8.40	0.054	ND	2.03	25.5	30.5	26.6	119
土壤污染管制標準		60	20	20	250	400	200	2000	2000

註：超過管制標準部分以粗體底線表示。

表 1-5 環保署補充調查土壤 TPH 檢測結果(2009.10.16)

點位編號	採樣深度(cm)	TPH _g	TPH _d	TPH
		mg/kg		
S9801-01	130-150	<10	<50	--
S9801-02	180-200	<10	25700	25700
	230-250	<10	144	144
S9801-03-01	130-150	350	48200	48550
S9801-04	80-100	112	16500	16612
S9801-05	80-100	<10	<50	--
S9801-06	0-15	<10	<50	--
S9801-07	0-15	<10	<50	--
S9801-08	30-50	<10	<50	--

註：超過管制標準部分以粗體底線表示。



圖 1-3 環保署補充調查簡易井位置示意圖

表 1-6 環保署補充調查地下水重金屬檢測結果

項目	方法偵測極限	簡易井			民井			管制標準
		TW-9801-01	TW-9801-02	TW-9801-03	01	02	03	—
		mg/L						
砷	0.0005	ND	0.0013	0.0010	0.0011	ND	0.0011	0.5
鎘	0.001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.05
鉻	0.004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5
銅	0.004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10
汞	0.0003	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.02
鎳	0.004	<0.020 (0.004)	<0.020 (0.010)	<0.020 (0.005)	ND	ND	ND	1.0
鉛	0.005	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.5
鋅	0.007	0.032	0.164	0.030	ND	<0.020 (0.018)	0.021	50

註：第二類地下水污染管制標準。

表 1-7 環保局補充調查地下水 TPH 檢測結果

分析項目	監測井名稱	九如鄉九清段 1340 地號			第二類地下水標準	
	監測井編號	TW9801-01	TW9801-02	TW9801-03		
	監測井座標	X：196610 Y：2515830	X：196624 Y：2515799	X：196661 Y：2515799	管制標準	監測基準
	單位	99/5/10	99/5/10	99/5/10		
水溫	℃	31	29.7	29.4	—	
pH 值	-	6.96	7.00	6.80	—	
導電度	μS/cm	725	753	769	—	
溶氧量	mg/L	3.07	0.95	0.67	—	
氧化還原電位	mV	151	109	96	—	
TPH-d	mg/L	0.693	6.17	1.85	10	—

六、調整公告範圍歷程

由於整治場址與控制場址範圍落差較大，因此屏東縣政府環保局依環保署補充調查成果修正控制場址範圍，調整如環保署公告之整治場址範圍，且於 2011 年 5 月 12 日再次於整治場址公告範圍周邊進行補充調查。調查方法係以主觀判斷法於整治場址周邊佈設 3 個採樣點（圖 1-1，編號 S01～S03）。此外為確認地下水品質，同時針對場址內所設之三口簡易井進行採樣與總石油碳氫化合物(TPH)分析。檢測結果(表 1-8)顯示，土壤重金屬及 TPH 皆未超過法規標準，而地下水濃度亦低於第二類地下水污染管制標準。基於此，環保局遂於 2011 年 6 月 27 日調整公告本土壤污染控制場址及管制區範圍為 1800 平方公尺，污染物為重金屬鉻(Cr)、鋅(Zn)及 TPH。

表 1-8 環保局補充調查土壤檢測結果(2011.05.12)

採樣編號	S01	S02	S03	監測 標準	管制 標準
採樣深度(cm)	30-60	0-30	0-30		
mg/kg					
鎘	0.71	0.68	0.69	10	20
鉻	18.9	19.2	19.8	175	250
銅	26.8	20.1	20.2	220	400
鎳	23.7	25.0	27.0	130	200
鉛	23.6	23.0	19.9	1000	2000
鋅	126	98.1	162	1000	2000
TPH _g	ND<1.73	ND<1.73	ND<1.73	-	1000
TPH _d	13.5	14.0	658		

1.2 計畫目的

綜上所述，本計畫之試驗土地為公告之土壤污染整治場址，土壤已受鉻、鋅及總石油碳氫化合物之污染，故本計畫之主要目的與重要性為：

- 一、整治污染土壤：依據土水法之規定，污染場址之污染行為人或土地相關人員有責任改善污染情況，使污染物濃度降至法規標準或預定之目標值以下，以減輕並解除污染之影響，且避免污染範圍擴大。由於本場址之污染行為人陳福長先生經濟情況不佳，事後已走避而難於短期內進行整治，加以本場址土地屬於屏東縣政府，因此期盼以本模場試驗改善並整治污染，未來再循法律或其他途徑向陳福長先生追索所發生之費用。
- 二、公有地整治表率：如上所述，污染行為人陳福長先生已無法於短期內進行本場址之整治，而本場址土地又屬於屏東縣政府公有地，在政府要求私有污染土地進行改善之同時，本計畫之執行將有政府整治污染場址之表率與宣示效果。
- 三、避免持續污染地下水：由上述本場址歷次採樣與檢測資料得知，目前污染僅限於土壤，而地下水中之重金屬與總石油碳氫化合物則符合法規標準。不過，雖然環保署補充調查測結果（表 1-7）顯示，地下水中之重金屬含量甚微，然而表 7 之數據亦同時指出，簡易井 TW-9801-02 之 TPH 含量已達 6.17 mg/L，顯見 TPH 有向下移動之現象，本計畫之執行若能降低土壤之污染情形，將可緩解 TPH 之持續傳輸而進一步污染地下水。
- 四、生物復育（bioremediation）試驗之現場應用：第一年之計畫主持人高師大陳士賢教授曾於 2008-2009 年間執行土污基管會委託之「以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術」計畫。結果發現，土壤若受柴油污染，其所吸附之多環芳香族碳氫化合物(polynuclear aromatic hydrocarbons, PAHs)濃度可隨時間而自然衰減，惟其衰減程度受場址物化條件及是否有 PAH 分解菌等條件之影響。該研究顯示，若於污染土壤中引進蚯蚓，則蚯蚓的存在與運動行為，有助於減低污染土壤之 PAH 濃度，因此可提高 PAHs 之生物降解。以該計畫實驗設計之柴油高污染土壤為例，蚯蚓可在 TPH 濃度數萬至 10 萬 mg/kg 之環境下協助 PAHs 減量。因此在蚯蚓可耐受的污染物濃度範圍內，若提供適合蚯蚓生存的因子(如濕度、堆肥)，則添加蚯蚓將有助於提高復育之能力，並加速去除土壤中之污染物質。該計畫除評估適合 PAH 分解潛勢之蚯蚓外，亦篩選出五種分解菌，這些成果已於第一年至第三年應用於本場址之整治，初步成果證實可提升該室內生物試驗之現場應用性。惟因生物分解需較長時間以顯現效果，故 104 年度將持續施放蚯蚓與石化分解菌，且加以妥善管理並評析其分解效益。

五、植生復育(phytoremediation)之現場應用：植生復育法因可利用植株之攝取(uptake)與代謝(metabolism)等生理作用，植株分泌酵素(enzyme)之作用，土壤微生物(soil microbial)之分解作用，以及植株與根圈微生物(rhizosphere microbial)之交互作用，對土壤污染物進行植生除污(phytodecontamination)、植生穩定(phytostabilisation)、植生萃取(phytoextraction)與植生分解(phytodegradation)之功能。因此，近年來已被公認為去除或降解各種有機或無機污染物最為價廉、經濟、實用與有效的方法之一。由於過去我國植生復育之相關研究皆以篩選高清除效率植生種類為主，現場植生整治之案例甚少，本計畫除生物復育外，亦搭配木本植物白楊、構樹、血桐，與草本植物太陽麻之栽植進行植生復育，其結果將可做為此工法現地應用之參考，使我國之土壤與地下水污染整治技術增加另一選項。

六、生物復育與植生復育結合試驗：由於生物復育法之效果與其生存環境條件關係密切，一般而言較易提供表層土壤適合之氧氣、溫度、溼度、營養鹽等條件，深層土壤則反之。由本場址之調查資料顯示，目前污染物之分佈深度可達2公尺，故本計畫同時進行深根系之白楊、構樹、血桐，與淺根系太陽麻之栽種，除可彌補生物復育法之不足外，植株之栽種亦可因其遮蔭、保水、增進有機質含量與根系活動而提供生物適合之生存條件，發揮相輔相成之功效。此兩種復育法之結合試驗，亦為本計畫之特色，其結果可提供未來土壤與地下水污染另一複合整治技術。

1.3 工作項目

本計畫之工作項目包括下列各項：

- 一、試驗區之管理：定期進行澆水、除草、施肥與病蟲害防治，提供植物與分解生物妥適之生存環境，使發揮污染物降解效果。
- 二、生物復育試驗施作：持續進行蚯蚓與石化分解菌之施放與繁殖，使發揮污染整治效用。
- 三、植生復育試驗施作：持續進行白楊、構樹、血桐之管理與太陽麻之栽植及收成，使發揮污染整治效用。復育成效評析。
- 四、土樣採集與分析：定期採集土壤樣品，分析重金屬與TPH含量，並據以評析污染改善效益。
- 五、植物生理調查與採樣分析：對所有復育植物進行生育調查，進行白楊、構樹、血桐之生理試驗，且採集植體樣品分析其重金屬含量，並據以評析污染改善效益。

六、復育效益評析：綜合土壤與植體樣品之分析結果，評析植生與生物復育之污染改善效益。

1.4 執行經費

本研究之執行經費為一百萬元整。

1.5 章節摘要

本計畫場址位於屏東縣九如鄉大坵村，受污染行為人非法從事廢機油提煉與回收處理作業而污染土壤，公告整治場址範圍為 1,800 平方公尺，公告污染物為鉻、鋅及總石油碳氫化合物。計畫之主要目的在於以木本植物白楊、構樹、血桐，草本植物太陽麻、牛筋草進行植生復育，且以蚯蚓與石化分解菌進行生物復育，以改善污染狀況。其重要性為整治污染場址、做為公有地整治表率、避免持續污染地下水、現地生物復育施作與現場植生復育施作等，其結果將可做為此工法現地應用之參考，使我國之土壤與地下水污染整治技術增加另一選項。

第二章、文獻探討

污染土壤之整治工法甚多，包括各種物理、化學、生物與工程法，目前我國常見之工法為移除處理、翻轉或客土稀釋、酸洗、抽除處理與生物分解等，前三者主要應用於重金屬等無機污染場址，後兩者則多見於有機污染場址。本計畫場址之污染物為重金屬鉻(Cr)、鋅(Zn)及總石油碳氫化合物(TPH)，第一年使用之生物復育法，係利用蚯蚓及過去研究來自石化污染場址中所分離的菌種，進行 TPH 生物降解，蚯蚓對 TPH 會有較快速與明顯之降解效果，國內外已多有研究與現場成功案例可資佐證。至於植生整治法係藉由植物與土壤微生物之交互作用，使污染物穩定化，再經萃取、降解、揮散而去除，近年來已被公認為去除或降解各種有機或無機污染物最為價廉、經濟、實用與有效的非入侵性污染防治替代方法，亦有許多室內研究與現場整治之成功案例可資參考。以下將針對本計畫使用之生物復育法與植生整治法分別概述之。

2.1 石油碳氫化合物之生物復育

生物復育技術是利用微生物或微生物程序，轉換及分解污染場址的污染物，以達到整治之目標。採用生物技術的優點包括可現址處理、處理費用較低、生態相容、確實分解污染物等，但也有技術選擇困難、處理時間較長、可能產生副產品等缺點。目前已發展之處理技術大致可分為下列幾項：第一類是生物促進法(Biostimulation)活化場址內既有的微生物族群，如添加可生物分解之介面活性劑或營養鹽。第二類為生物添加法(Bioaugmentation)，直接添加對污染場址污染物有去除分解能力的微生物，此部份可利用基因工程技術，發展具特定污染物分解能力之基因重組微生物，但由於基因重組微生物添加至自然環境中，必需考量其毒性及對生態系之影響，因此必須經過嚴密而謹慎的審查後才可實施。第三類為生物處理法(biological treatment)：將污染物經通氣或土壤洗滌後送至特殊生物反應器、生物濾床或生物洗滌塔去除污染物，或是採用農地施用、堆肥處理。

石油碳氫化合物污染可概括分為(1)總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbons, TPH)：包括直鏈烷、支鏈烷、環烷類及烯類等；(2)芳香族碳氫化合物(aromatics)：包括油品揮發性組成物如 benzene、toluene、ethylbenzene 及 xylenes (合稱 BTEX)、其他單苯環芳香族及多苯環芳香族碳氫化合物；(3)油品添加劑：主要為 MTBE (methyl tertiary-butyl ether)或醇類等毒性物質。這些物質都會對各類生物造成傷害。由於石油降解微生物種類非常廣泛，惟根據這些石油碳氫化合物的類別，可以概略分為三種類群。第一類為降解總碳氫化合物的微生物(hydrocarbon degrading bacteria)；第二類為降解 MTBE 的微生物(MTBE-degrading

bacteria；第三種為降解 BTEX 的微生物(BTEX-degrading bacteria)，茲分別介紹前人之研究成果。

就降解總碳氫化合物的微生物而言，前人研究中發現可能有下列幾屬，包括 *Candida*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*，這些菌屬可能對較長碳氫鏈會進行分解(Cavalca et al., 2000；Cassidy et al., 2001)。而就降解 MTBE 的微生物而言，可能包括 *Rubrivivax*, *Mesphilicum*, *Rhodococcus*, *Graphium*, *Alcaligenes*, *Xanthobacter*, *Xanothomas*, *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Hydrogenophage*, *Methylobacterium*, *Austroafricanum*，這些菌屬可以將 MTBE 完全代謝分解或轉換為無毒物質(Deeb et al., 2000；Prince et al., 2000；Fiorenza et al., 2003)。至於降解 BTEX 的微生物則較前兩類複雜，針對四種成分之降解菌也互異。可以降解苯的細菌有 *Pseudomonas*, *acinetobacter*, *Methylosinus*, *Nocardia*, *Methanogens* 等；降解甲苯的有 *Methylosinus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Cunninghamella*, *Achromobacter*, *Methanogens* 等；而降解乙苯者只有 *Pseudomonas*；至於降解二甲苯者則有 *Pseudomonas*, *Methanogens* 兩屬(Wiedemeier et al., 1999)。此外 *Microbacterium*, *Azoarcus*, *Mycobacterium* 與 *Bradyrhizobium* 等也可分解 BTEX，至於分解那類化合物則仍未確認(Cavalcaet al., 2004)。由於這些微生物在代謝各類污染物時，其分解能力受環境因子的影響，因此在利用這些優勢菌種進行石油碳氫化合物污染整治時，必須配合優勢菌種生長條件的最佳調控，加強生物整治的效果；例如石油碳氫化合物的有氧降解(aerobic degradation)效率遠高於厭氧降解(anoxic degradation)，故須必須配合優勢菌種生長條件做最佳的調控，加強生物整治效能。

第一年之計畫主持人高師大陳士賢教授，曾於 2008 至 2009 年執行環保署土污基管會委託研究計畫「以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術研究」，從汽油洩漏污染場址中分離出五株菌株(*Pseudomonas* sp. NKNU01、*Bacillus* sp. NKNU01、*Klebsiella* sp. NKNU01、*Enterobacter* sp. NKNU01 與 *Enterobacter* sp. NKNU02)，2010 至 2011 年執行環保署土污基管會土壤及地下水污染研究計畫「應用生物反應槽進行石化污染物之生物復育研究」，針對主要汽油添加物甲基第三丁基醚(MTBE)進行生物分解試驗，依先前研究的微生物族群結構，將不同的純菌株植入生物反應器中，進行生物復育成效探討，藉以評估菌種對污染物之分解能力，進而尋找分解 MTBE 能力最佳之菌種。此外，同時進行在各種條件下污染物分解能力之評估，且推估微生物之分解 MTBE 途徑。

在上述計畫之批次實驗中，混合菌加入共代謝物質降解效果為最佳，可降解 MTBE 約達 64%；就單一菌種而言以 *Bacillus* sp. NKNU01 最佳，可降解 MTBE 約 21%；而共代謝物質中則以正戊烷(Pentane)具有最佳效果。另外，不添加共代謝物質試驗中，發現 *Enterobacter* sp. NKNU02 降解 MTBE 效率約達 29%，較添加共代謝物質之效率佳，且為單一菌種試驗中降解 MTBE 潛力最佳之菌種。

生物反應槽試驗結果顯示，*Enterobacter* sp. NKNU02 可於不添加共代謝物質下分解約 56%之 MTBE；而在加入共代謝物試驗中，*Bacillus* sp. NKNU01 與 *Klebsiella* sp. NKNU01 降解 MTBE 皆約達 22%，與批次實驗結果皆有顯著差異，顯示利用生物反應槽可促進生物降解效率。由此研究結果顯示，*Enterobacter* sp. NKNU02 為分解 MTBE 之最佳潛力菌種，蛋白質鑑定其代謝蛋白包含 alcohol dehydrogenase、phospho- glyceromutase、transaldolase 與 isocitrate dehydrogenase；另外利用 GC/MS 進行定性分析，推估其可能之代謝產物為 acetic acid、2-propenoic acid 與 2-propanol。實驗發現 *Enterobacter* sp. NKNU02 進行 MTBE 分解時，不經過第三丁醛(*tert*-butyl formate, TBF)轉化，而直接氧化生成第三丁醇(*tert*-butyl alcohol, TBA)，進而生成 2-Propanol 與 Lactate，再進入 TCA cycle，完成 MTBE 代謝作用。

此外，以添加 BTEX 模擬汽油洩漏後之降解實驗結果發現，*Enterobacter* sp. NKNU02 分解 MTBE 會受 BTEX 所抑制，使降解率約減為 16%。然而，BTEX 亦會被 *Enterobacter* sp. NKNU02 分解，其中以甲苯之 36%為最佳，其次為苯之 32%，故此菌種對其他汽油污染物亦具有降解效用。本計畫第一與第二年即應用此菌種進行污染場址之生物復育，結果顯示具有相當之降解效果。

2.2 蚯蚓復育污染土壤

蚯蚓為土壤中的主要生物量，約佔 60-80%，且對土壤的性質與功能具有重要的影響，故為土壤中化學物質測試的指標性物種。它們利用攝食而混合土壤使其肥沃，在土壤中活動時所鑽出之孔洞，可以達到翻覆與增進通風及排水之效果。蚯蚓可以獨自或與其他生物聯手進行土壤有機物之分解、營養再生及增進構造，同時也具有食用其他生物或提供其他生物食物等功能。若土壤遭受污染而使蚯蚓迴避、減量或死亡，則對於土壤功能與生態系統之維持與運作都會有極大之負面影響(Lukkari et al., 2005)。

若土壤遭受污染，則溶於水中的污染物可經由蚯蚓體表的吸收而進入體內，亦可藉由攝食土壤而由腸道吸收而累積親脂性有機污染物，故其體內的有機污染物含量會隨土壤的攝取量增減。前人研究結果指出，蚯蚓的攝食土壤行為有利於 phthalate、phenanthrene 及 fluoranthene 等有機污染物的降解；亦有學者發現；蚯蚓與微生物的搭配作用有助於 PAHs 的降解；有些報告指出，在陸生蚯蚓 *Eisenia fetida* 體內發現可以代謝 benzo(a)pyrene 的細胞色素 P450。此外，蚯蚓也是石化污染物毒性測試的良好模式生物。在封閉系統內，韓國研究者發現 *Perionyx excavatus* 和 *Eisenia andsei* 等兩種蚯蚓對於 MTBE 之死亡及體型異常反應測試，可在 72 小時內產生非常靈敏且明顯的反應 (An, 2005)。德國利用 *Eisenia fetida* 之致死測試、生殖檢驗及迴避檢測評估原油污染之土壤毒性，也發現蚯蚓對石化污染物測試具有敏感及明確之反應。不過，研究者皆同意，不同物種對特定污染物之反應應該分別予以評估，無法一體適用。

經濟合作與發展組織 (OECD) 的 207 號標準測試方法指出，蚯蚓可做為大範圍化學物質之測試，其適用對象通常為 PAHs、爆裂物(explosives)、殺蟲劑、chlorophenols、重金屬、鉛、鉻與鎳。其推薦的蚯蚓種類是 *Eisenia fetida*，牠多出現在高有機質土壤，雖然不是典型的土壤物種。但對化學藥品的敏感度與土壤物種相似 (OECD, 2004, NO. 207)。對於多環芳香族碳氫化合物，蚯蚓也具有生物累積與敏感反應毒性之能力。Parrish 等人(2006)發現，*Eisenia fetida* 和 *Lumbricus terrestris* 均有自土壤累積 PAH 至其體內之現象，而累積濃度會隨蚯蚓物種與土壤 PAH 衍生物類別而有差異。Jager 等人(2003)利用 *Eisenia andrei* 探討 PAH 在土壤中之生物可利用性(bioavailability)也獲致相似結論。瑞典學者 Eijsackers 等人(2001)也指出，蚯蚓的存在與活動有助於提高 PAH 之生物降解，從而減低污染土壤之 PAH 濃度。

近年來，美國與歐洲均投入大量研究資源以使用蚯蚓發展毒理測試、土壤復育和瞭解生態系衝擊等相關研究。發現外來種蚯蚓入侵會使土壤內碳循環、磷循環、元素比例(如 C:N)、植物根系分布、微生物組成及本土蚯蚓群聚結構等發生改變，在未來數十年可能改變全球土壤特質。此外，蚯蚓在不同農業型態之物種分布(Whalen, 2004)與土壤中農藥吸附作用(Gevao et al., 2001)、有機物累積(Jager et al., 2005)及吸附途徑(Jager et al., 2003)、重金屬之移除如鋅(Scott-Fordsmand et al., 2004)、鎘(Sturzenbaum et al., 2004, Burgos et al., 2005)與銅(Burgos et al., 2005)等層面之探討，亦有明顯進展。

以上研究結果指出，蚯蚓具有累積與降解土壤中 PAH 之能力，而不同蚯蚓以生理、生化及代謝等生物反應降解土壤 PAH 之過程及運作，仍須進一步瞭解。

此外，此能力受到蚯蚓物種、土壤環境變化和 PAH 存在衍生物之影響，而其影響機制與方式仍待未來深入探究。這些訊息之釐清，對於土壤石化污染物之移除及復育，有重要之商業發展潛力與意義。

台灣地區蚯蚓研究沉寂多年，近年來持續有新的成果發表(Tsai et al., 1999; Chuang and Chen 2002; Shen et al., 2002)，物種數量已快速累積超過 50 種，估計總種類數應有百種以上，顯見台灣蚯蚓的豐富度，目前相關研究多集中於北部與中部，南部較少。而利用該生物進行土壤毒理與復育等研究方向，在台灣則剛起步，具有寬廣之發展空間。

如上所述，第一年之計畫主持人於 2008 至 2009 年曾執行環保署土污基管會委辦之「以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術」研究計畫，嘗試以蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術，經耐受實驗結果選定 *Eisenia fetida* (紅蚯蚓)和 *Perionyx excavatu* (掘穴環爪蚓)此兩種蚯蚓作為復育多環狀芳香族碳氫化合物(polynuclear aromatic hydrocarbons, PAHs)實驗物種(圖 2-1)。



Eisenia fetida



Perionyx excavatu

圖 2-1 兩種試驗蚯蚓之外觀

在該研究中比較兩種蚯蚓復育 PAHs 之成效並無明顯差異，該實驗結果顯示，柴油污染土壤的最佳復育天數為 60 天，可降低 PAH 濃度為 100 mg/kg 的柴油污染土壤中 90% 以上 PAHs。比較 120 日復育期程後，掘穴環爪蚓在低及中柴油污染土壤中存活率較紅蚯蚓為高，但紅蚯蚓在高柴油污染土壤有較高存活率。結果亦發現，土壤若受柴油污染，土壤所吸附之 PAHs 濃度將隨時間自然衰減，其衰減程度將視場址物化條件及是否有 PAH 分解菌等條件影響，但蚯蚓存在與運動行為，將有助於提高 PAHs 之生物降解，從而降低污染土壤之 PAH 濃度。

以該計畫所設計之柴油高污染土壤為例，蚯蚓可在高 TPH 環境下協助 PAHs 減量，此點可做為蚯蚓對石化污染場址整治時的參考。亦即於柴油污染土壤中，在蚯蚓可耐受的污染物濃度範圍，施放蚯蚓並提供適合其生存的因子(如濕度、堆肥)，可加速去除土壤中之 PAHs，提高復育之能力。考量本場址為潤滑油及機油污染，因此本計畫第一與第二年除使用蚯蚓進行復育外，並搭配石化分解菌，進行污染場址之現地生物整治，本年度持續進行以達清除污染之目的。

2.3 植生復育

植生復育法(Phytoremediation)是一種利用植物來清理環境中污染物的方法。亦即利用現地植物(in-situ)以移除、分解或稀釋方式，減少土壤、淤泥、沉積物或地下水中之污染物。其清理之污染物種類包括重金屬、殺蟲劑、爆裂物及油品等，此外，也有助於降低污染物藉由風、雨及地下水，自場址擴散至其他地區。

植生復育法最適用於處理低至中污染量的場址。當植物的根部自污染的土壤、河流及地下水中吸取水分及養分時，也能同時移除其中的有害物質。植物清除污染物之範圍與根系類別有關，木本植物的根系分布比草本植物深廣，清除範圍也較大。污染物質進入植體後可能產生之變化為(1)被貯存在根部、莖部或葉部；(2)在植體內被轉化為比較無害的化學物質；(3)在植物進行蒸散作用時被轉化成氣體釋放至空氣中。

污染物即使未被植物的根吸取至體內，植生復育法也能發生作用。例如當污染物黏附或吸附在植物根部，或是被根圈微生物轉化成比較無害的化學物質。種植植物並用來吸取污染物，然後再藉由收割及銷毀而逐漸降低其濃度。使用植生復育法所需時間，決定在下列因素：(1)復育植物的種類及數量；(2)污染物的種類及數量；(3)污染面積的大小及深度；(4)土壤的種類及場址條件，這些因素隨場址之不同而異，當選擇以此法進行污染場址復育時都必須加以考量、評析與篩選。

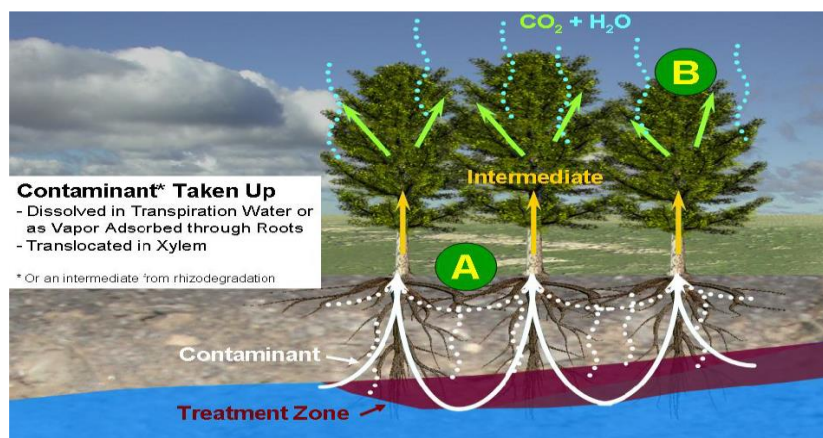
如上所述，植生復育法係藉由種植植物以獲得改善污染之效益，同時植物吸收之重金屬可回收(Tang et al., 2012)，比較其他方法，所需之設備、人力及其他資源較少且兼具商機，而植栽也同時具有綠美化效果，亦即植生復育乃結合並利用陽光、植物及微生物之特性，執行成本低廉，且兼顧自然景觀與污染整治，故為綠色整治概念之污染整治技術。此法之特性包括以下項目：

1. 所需能源來自植物之光合作用，為地球上最價廉、最豐富、最有效率之能源。
2. 植株根毛之有機質有助於土壤微生物之種類、數量及活力增加，促進其分解作用。

3. 土壤及地下水污染場址因植物之種植而改善其景觀與民眾之觀感。
4. 植物除可吸除污染物外，並可形成阻隔帶以防止污染物擴散。
5. 植株可以釋放光合作用所產生的氧氣，有助於空氣品質之提升。
6. 植株的根部將氧氣注入根系區域，可促進土壤微生物之生長及污染物之分解。
7. 檢測植物之成分與變化，可以推估污染物分解的結果，做為整治進程之指標。

一般而言，植生復育包括以下各項作用機制：

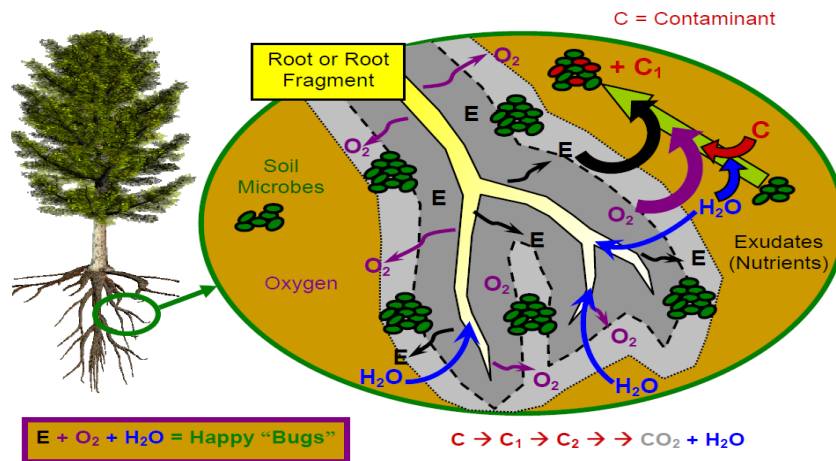
1. 植物分解作用(Phytodegradation)：植物將污染物吸收至體內，再藉由光合作用及體內之酵素，將污染物分解或改變其化學組成(圖2-2)。



參考及引用資料來源：ITRC(2009)

圖2-2 植物分解作用-A為植物酵素作用，B為光合作用

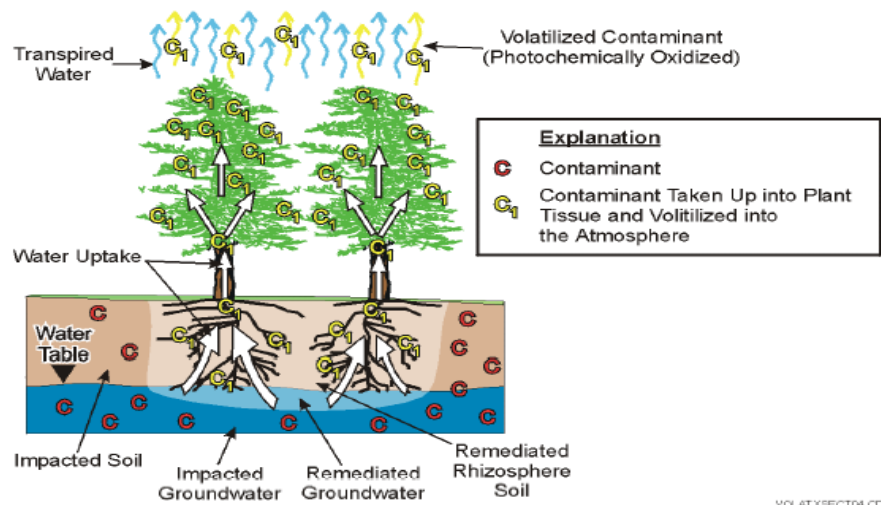
2. 根圈土壤分解作用(Rhizodegradation)：在植物根圈部位，與微生物相互作用，分解土壤中污染物，如圖2-3所示。



參考及引用資料來源：ITRC(2009)

圖2-3 根系土壤分解

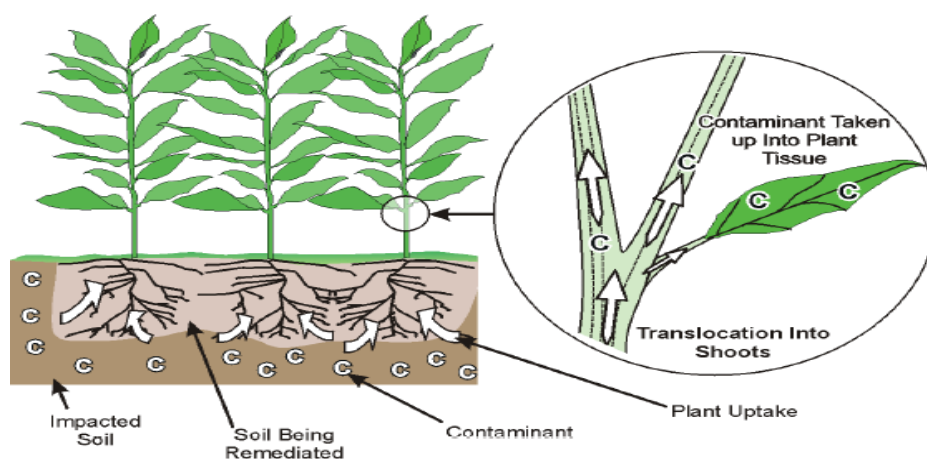
3. 植物揮發作用(Phytovolatilization)：植物自土壤中吸收污染物進入體內後，隨植物呼吸作用，經由葉片排入大氣之中(圖2-4)。



參考及引用資料來源：ITRC(2009)

圖2-4 植物揮發作用

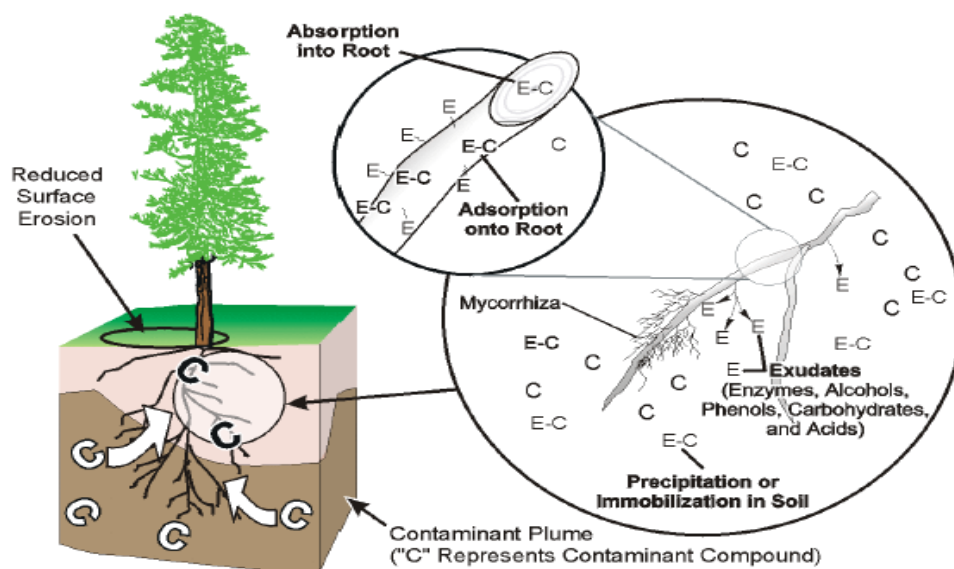
4. 植生萃取作用(Phytoextraction)：植物自土壤中將金屬等污染物吸收並傳送至植體各部分組織儲存(圖2-5)。部分植物具有重金屬超量累積特性，可在植物葉片上將Ni、Co、Cu、Cr、濃縮至0.1%。某些化學藥劑可促進重金屬的移動性、植物有效性及累積濃度增加，藉以縮短植生萃取所需之時間(圖2-5)。



參考及引用資料來源：ITRC(2009)

圖2-5 植生萃取作用

5. 植物穩定化作用(Phytostabilization)：此機制乃藉由根系之吸收與沉澱作用，達到穩定污染物的目的。亦即利用植物根部所分泌之有機或無機物，與污染物反應而限制其在土壤中的移動性和生物有效性。此種植物須能忍受高濃度污染物，並利用吸附、沉澱、複合或還原等方式穩定污染物及土壤結構(圖2-6)。



參考及引用資料來源：ITRC(2009)

圖2-6 植物穩定化作用

有關植生復育之應用，國內已有諸多研究(周國華等，2002；曾彥學，2009)，例如「重金屬污染土壤之植生復育技術與案例分析」(賴鴻裕、陳尊賢，2003)、「台灣利用花卉植物移除土壤重金屬相關研究之回顧」(賴鴻裕、陳尊賢，2005)等。我國目前已有相關列管場址使用植生復育法，如「新屋鄉台15線53.5K土壤及地下水污染改善計畫」、「花蓮供油服務中心北埔庫區」等，未來可持續推動植生復育技術，運用在更多污染類型之場址中(吳翊豪，2009；李芳胤等，2013；林浩潭等，2005；陳士賢等，2012；程淑芬，2013；葉琮裕，2013；賴鴻裕、盧至人，2007)。

本計畫執行前兩年(101、102 年)皆同時進行生物與植生復育，其中之植生復育分別栽植深根系之白楊與淺根系太陽麻，除可探討此二植物對試驗區污染物之改善效果，亦可彌補生物復育法之不足，且植株之栽種亦可因其遮蔭、保水、增進有機質含量與根系活動而提供生物適合之生存條件，發揮相輔相成之功效。去年度則增加本土木本植物構樹、血桐，與草本植物田青之栽植與生長、復育評估。生物與植生復育法之結合，本土植物之試驗，皆為本計畫之特色，其結果可提供未來土壤與地下水污染另一複合整治技術。

2.4 章節摘要

本章介紹國內外對石油碳氫化合物之生物復育研究成果，尤其以第一年之計畫主持人高師大陳士賢教授，於 2008 與 2011 年執行環保署土污基管會委託之石化污染土壤復育技術研究計畫，據以選擇本計畫生物復育所使用之蚯蚓與分解菌，其中蚯蚓選用紅蚯蚓(*Eisenia fetida*)，石化分解菌種則為 *Pseudomonas* sp. NKNU01。此外，也介紹植生復育之機制，包括植物分解作用、根圈土壤分解作用、植物揮發作用、植生萃取作用與植生穩定化作用，做為本計畫之理論基礎與選取植生復育植物之依據。

本計畫依據國內外研究結果選擇生物復育之蚯蚓與分解菌，以及植生復育所栽植之植物種類。其中試驗所施放之蚯蚓選用紅蚯蚓(*Eisenia fetida*)，石化分解菌種則為 *Pseudomonas* sp. NKNU01。至於植生復育所栽植之植物係擇取木本植物白楊、構樹、血桐與草本植物太陽麻。

第三章、研究方法與過程

如前所述，本計畫之試驗內容包括試驗區管理、生物復育試驗施作、植生復育試驗施作、土樣採集與分析、植物生理調查與採樣分析、復育效益評析等，研究方法及步驟如下各節所述。

3.1 試驗區規劃

本計畫係沿用第一、二年之試驗區進行。試驗區之規劃乃以公告污染場址為範圍，且依據歷次調查結果及本計畫執行初期整地時所發現之廢油桶堆置及掩埋區，設置六個試驗區，其分佈如圖 3-1 所示。其中 CK 代表無污染之對照區(Control)，其餘五區為處理區，其中 BP1、BP2 及 BP3 代表同時進行生物與植生復育之試驗區(Bio-phytoremediation)，而 PR1 與 PR2 則為進行植生復育(Phytoremediation)之試驗區。

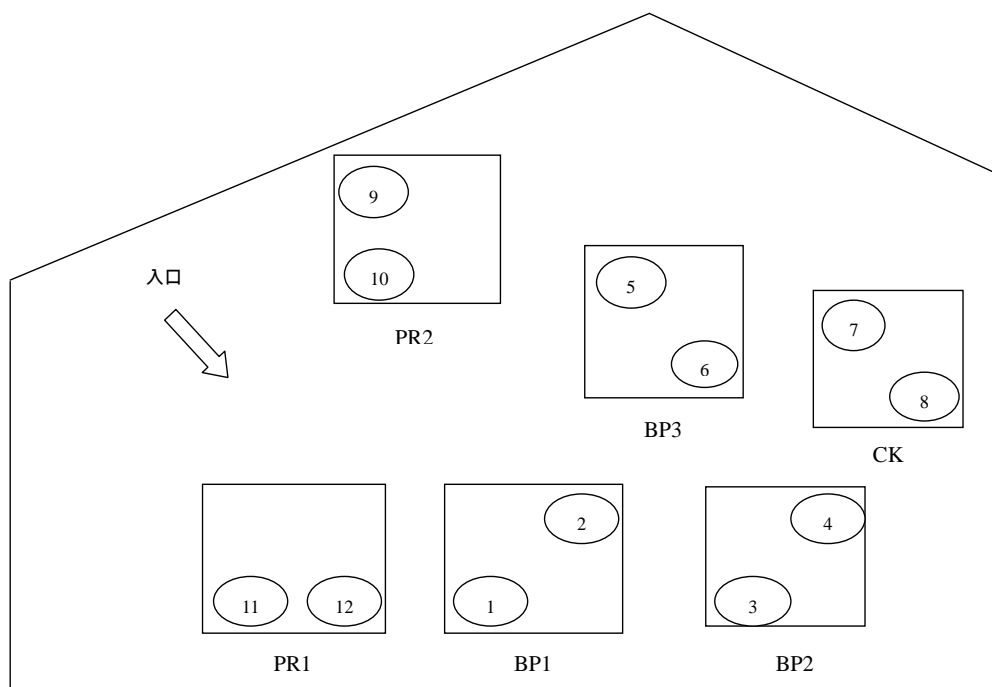


圖 3-1 試驗區與土壤採樣點配置圖

3.2 試驗區管理

本項工作包括定期進行澆水、除草、施肥與病蟲害防治，以提供植物與分解生物妥適之生存環境，使發揮污染物降解效果。

一、澆水

試驗場址除裝設六套噴灑設施並以定時器控制澆水時間外，且聘僱臨時工每天依天候與植物生長情況調節噴灑時間，同時進行必要之人工補灑，以保持土壤水分維持於田間容水量範圍，提供植物與分解生物最佳之水分條件。

二、除草

由於屏東之氣候與試驗場址之環境條件適於植物之生長，因此本場址極易蔓生雜草，雖然適度之雜草覆蓋有益於土壤水分之維持與蚯蚓及分解菌之活動，惟過度茂盛之雜草亦可能與試驗生物產生資源競爭而有負面影響，故而本計畫會視雜草與試驗生物之生長狀況聘僱臨時工加以清除。

三、施肥與病蟲害防治

為使試驗植物獲得足夠之養分，本計畫視白楊樹與太陽麻之生長狀況予以補充肥料。此外，三年餘之植栽經驗發現，白楊樹易感染鏽病，且與太陽麻皆易滋生蟲害，因此適時之病蟲害防治亦屬必要。

3.3 生物復育試驗施作

一、選擇蚯蚓物種

研究不同物種對污染物之反應應該考慮生態棲位之差異，本研究採用 *Eisenia fetida* 作為復育土壤石化污染物。*Eisenia fetida* 為歐洲進行土壤污染物檢測之常用物種，前人研究顯示其具有累積及降解石化污染物之能力（Parrish et al. 2006），*E. fetida* 也是國際土壤標準毒理測試使用之物種（ISO, 1993, 1998; OECD, 2004），喜愛生存於堆肥和糞肥中等富含有機質的環境，並非存在於一般土壤的品種（Bohlen et al., 2004）。該物種目前也被引入台灣，但多作為魚餌之用，釣具店稱之為「紅蚯蚓」，在台灣一般土壤中未曾被採集過，需用室內培養的方式養殖。雖然，*E. fetida* 在台灣地區之釣具店均有販售，但在野外分布之外來種蚯蚓物種名錄，並未發現該物種出現，故該物種對於台灣地區之土壤特性及污染場址之石化污染物是否具有與文獻提出相似之降解及累積能力，須由本計畫結果予以評估。第一與第三年之試驗已有正面效果，故本年度持續施放並評估其改善效益。

二、蚯蚓分類與培育

蚯蚓物種 *Eisenia fetida* (圖 3-2) 在一般釣具行均可購得，以紅蚯蚓稱之，購買時以單盒 10 條或秤斤販賣，若業者之來源為野外挖掘，其中可能混雜不同物種，若研究人員無蚯蚓之分類訓練與能力，將會影響後續之研究結果，因此本計畫蚯蚓統一購自單一飼養者，以確保來源品質。

Eisenia fetida 體長約 3-5 cm，寬度約 1-3 mm，具 32-37 環節，卵巢一對出現於 13 體節，10-11 體節具兩對睪丸與兩對受精囊 (spermathecae)，雄生殖孔則位於第 15 體節。本計畫所使用之個體，係於購入後在實驗室持續培育一週，以馴化及穩定試驗個體之品質。



圖 3-2 生物復育所使用紅蚯蚓(*Eisenia fetida*)

三、蚯蚓之施放

蚯蚓之吃土、鑽土行為會促進土壤通風，讓氧氣進入土壤縫隙中，可促進土壤中微生物的活動，進而增進土壤中 TPH 的降解機會。每一區塊施放數量為 5.4 公斤，施放時並以米糠拌入土壤中，以提供蚯蚓較佳之生長環境。

四、石化分解菌施用

1. 菌種來源

本計畫所植入之石化分解菌種係來自高雄市橋頭油庫之土壤，當地所儲存之油品包括汽油、噴射燃料油、柴油、煤油及各種潤滑油，石化產品包括乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、丁烷、丁烯、苯、甲苯、及二甲苯等。而由高雄師範大學生物科技系陳士賢教授在土壤中所分離之具有石化污染物分解潛力菌種，本計畫第一

與第三年已使用過，且具有降解 TPH 之效果，本年度將持續施灑並評估其改善效益。

2. 菌種培養

(1) 大量培養：利用 Nutrient Broth (NB)大量培養株菌。

(2) 更換培養液，用微生物緩衝液清洗：

- NB 培養 50mL 離心 10mins (4400 rpm)，倒去上清液。
- 1mL PBS(phosphate buffer solution) 回溶洗菌塊放於 2 mL 離心管，再離心 10 分鐘(4400 rpm)。
- 重複上述過程 3 次。
- 用 1 mL 培養液回溶菌塊。

(3) 使用分光光度計測菌量：利用 OD₆₀₀ 測出菌種的吸光值(稀釋方式:取 980μL 的 MSM 當 blank, 利用 20μL 的菌液測出原液濃度)。

(4) 利用原菌液直接將所需體積加入培養液。

(5) 再以生物反應槽-攪拌式生物反應槽 (Stirred Tank Bioreactor)大量培養(條件為 37°C、150 rpm)。

3. 實驗設備

攪拌式生物反應槽 (Stirred Tank Bioreactor)為總容積 5L 的玻璃槽體(圖 3-3)，容許運載量最高為 4L，藉由槽外底部之加熱板及槽內冷卻管調控槽體溫度，有一通氣管外接氣體流量計藉以監控槽體通氣量，兩個攪拌葉片藉著轉動軸的轉動而帶動槽內培養液的流動混合。

4. 施灑菌種

石化分解菌在實驗室大量培養後，配合生物復育實驗施作的區隔施灑，施灑菌種為 *Pseudomonas* sp. NKNU01，此菌株為兼具分解 MTBE 潛力之菌種，施灑時運送至現場，施灑區塊為圖 3-4 中 BP1、BP2 及 BP3。每一區塊以約 20 L(桶裝約 19-20 L 的菌量)培養之菌量，分別由各區塊採樣點(採樣點 1、採樣點 2、採樣點 3、採樣點 4、採樣點 5 及採樣點 6)向外延伸施灑，並於施用後定期灑水及提供營養鹽使微生物有較佳生長環境。

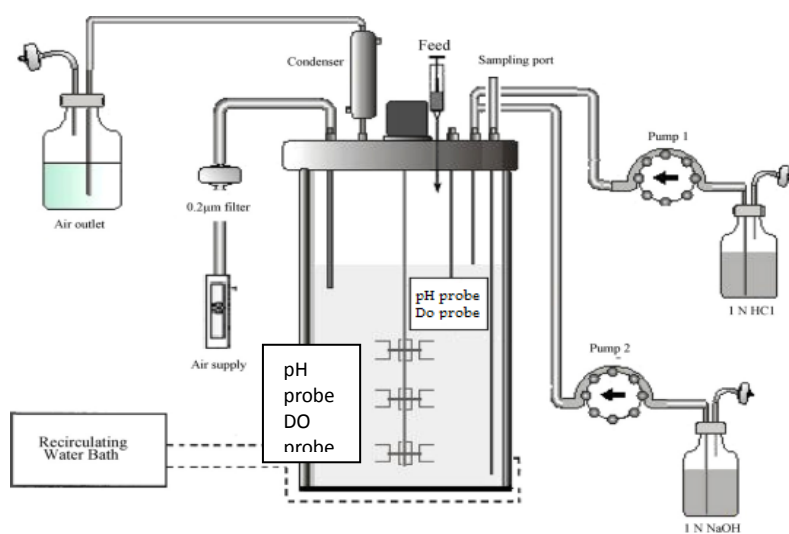


圖 3-3 生物反應槽-攪拌式生物反應槽 (Stirred Tank Bioreactor)

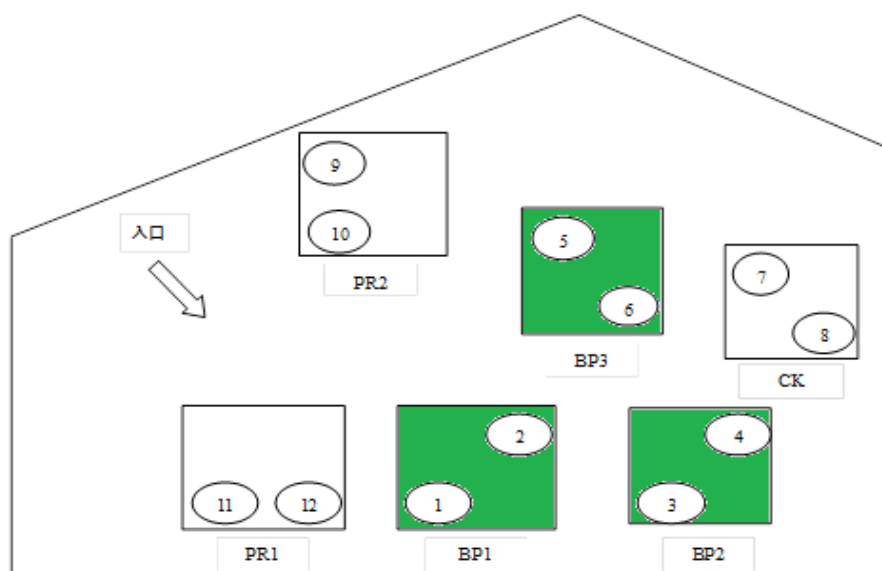


圖 3-4 石化分解菌施灑區塊(綠色區塊 BP1、BP2 及 BP3)

3.4 植生復育試驗施作

雖然本場址污染物之主要分佈土層為 0~100 cm，但仍有部分深層土壤遭受污染，因此本計畫遂以草本植物配合生物整治淺層污染土壤。由於深層土壤之環境較不易控制且生物活動亦較受限制，故針對深層土壤之整治法將以木本植物復育法為主，生物復育法為輔。試驗初期，無論草本或木本植物之根系多於淺層土壤發展，故與生物整治發揮相乘效果，對高污染之表層土將可收明顯效果，俟木本植物根系向深層土壤伸展後，植生亦可發揮相輔功效。茲將試驗內容概述如下：

一、樹種選擇

選擇植生復育樹種所需考慮之主要條件包括：

1、環境適應力強、生長迅速且清除效果高

多數污染場址之土壤環境條件較差，除污染物之毒性外，常伴隨 pH 異常或土壤貧瘠等不利因素，而其中又以污染物之植物生理毒性為最大限制因子。因此，復育樹種之首要條件為具有惡劣生長環境之適應力與污染物耐受力，此外還需有旺盛之生命力，快速生長並且吸收、分解與穩定污染物，以發揮清除與降解污染物之功效。

2、根系發達並涵蓋污染土層

復育樹種對污染物若欲發揮除污、穩定、萃取與降解的功能，其基本要件乃根系必須發展而接觸污染物方可竟其功。因此，優良樹種的根系必須密度大，且深度與廣度需涵蓋污染土層。

由於國內對重金屬與 TPH 污染場址之植生復育實場經驗甚少，因此，本計畫第一年係依據國外之研究與現場實作所得結果（Collins, 2007; Critchley, 1998; Euliss et al., 2008; Huang et al., 2005; Jordahl et al., 1997; Rentz et al., 2003; Tang et al., 2004），選取白楊（Poplars；*Populus bonatii* Levl.）做為木本試驗樹種；而草本植物則選擇太陽麻（Sun Hemp；*Crotalaria juncea* L.）（圖 3-5）。其主要理由乃兩者皆具有上述特色與功能，亦即可耐受油污與重金屬，並有高降解效果；此外，其光合作用及蒸散作用旺盛，生長快速，枝葉茂盛，根系發達且為深根性。同時，樹種取得容易、維護管理方便。前三年栽種後之生長情形與污染改善皆有正面效果，本年度持續進行試驗與效益評析。

由於白楊為外來樹種，且每年有高達 5~6 個月之落葉期，為使復育植物本土化，故 103 年度選擇木本植物構樹與血桐，配搭草本植物田青進行試驗，以篩選優良本土復育植物（圖 3-5）。基本上這些植物都具有環境適應性強、抗逆境性高、生長快速與分布廣泛等特質(台灣大百科全書，2013；維基百科，2013)。其結果皆分別與白楊樹及太陽麻比對，藉以了解各本土植物對於本場址污染物之耐受性與適應性外，並將優選植物作為未來本場址或其他相似污染場址植生復育之參考。103 年之試驗結果發現，構樹與血桐皆有相當復育效益，故本年度持續進行，而田青則因效益不佳，本年度不再播種。



圖 3-5 白楊(上左)、構樹(上中)、血桐(上右)、太陽麻(下左)、田青(下右)

二、栽植規劃

如上所述，國內植生復育之實場經驗較為欠缺，而本場址又兼具重金屬與 TPH 兩種污染物，故第一年即參考國外資料，選取優良之復育樹種白楊樹栽植，除期望藉由栽植而達到整治污染之目的外，並且希望藉由生理調查及植體分析，評析其功能，做為其他污染場址引用之參考。前兩年之栽植方式為行距與株距皆為 2.5 公尺。同時，再於行間栽植太陽麻，其作用為(1)可於淺層土壤發揮吸收與降解污染物功能；(2)根系可與微生物交互作用而促進生物復育功能；(3)良好的土地覆蓋可提供蚯蚓與分解微生物適當之溫度、濕度與有機質等有益生存環境；(4)可提供氮肥，有利土壤微生物之生存與活動。

本計畫第一年依白楊生長所需之伸展空間及現場機具作業之需求，以間距 2.5 m 於場地內栽種白楊，總計 350 棵。而場內各試驗區之植株數量分別為 CK 25 棵，BP1 及 BP2 各 12 棵，BP3 為 10 棵，PR1 為 9 棵，PR2 為 18 棵。此外，太陽麻栽植係於六個試驗區內進行。由於種子撒播後之萌芽率不一，故單位面積之植株數亦不盡相同，惟依實際播植之調查結果，平均約為每平方公尺 50 棵。

去年度係於白楊間距 2.5 m 之空間栽種構樹與血桐，每區 3 顆；總計於生物復育區栽植 9 顆(BP1~BP3)，植生復育區 6 顆(PR1~PR2)，對照區(CK) 3 顆，而田青則與太陽麻輪流栽植。

本年度係持續維護管理復育樹種白楊、血桐與構樹，並持續栽植草本植物太陽麻(田青因對重金屬之吸收累積量較低，故本年度不再栽種)，後者因生長期短，故須持續栽植、維護與拔除，預計一年二穫。

3.5 土樣採集與分析

如上所述，無論生物或植生復育之目的，皆為利用生物對本場址之污染物產生吸收、累積與降解之效果，藉以降低土壤中污染物之濃度。為了解其改善效果，本計畫於執行期間將採集試驗區土壤進行 TPH 與重金屬 (Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni) 分析。樣品係於六個試驗區內採集，每一區內有兩個採樣點 (圖 3-1)。其編號分別於試驗區代碼後以 -1 及 -2 (如 CK-1, CK-2 等) 標示之。採樣期程分別為第一年開始執行生物復育後一周定期採集。初期之採樣深度為 0~100 公分，後來自 102 年四月起增採 120 公分土樣加以檢測，其編號方式係於採樣點後分別以 -30, -60 及 -100 (如 CK-1-30, CK-1-60 及 CK-1-100) 表示之，每次採集 44 個土樣 (PR1 60 公分以下為水泥層，無法採樣)。

本年度於 8 月份採集一次土樣，土樣採集將分別於五個復育區選取二顆白楊，以樹幹為原點，50 公分為半徑，於東、南、西、北四方位各設一採集點，分別採集 0~30、30~60、60~90 及 90~120 公分之土壤，各層土壤混合為一混樣，故每一復育區共有 8 個土樣，五區合計 40 個樣品；對照區則因歷次重金屬分析值差異不大，故僅於各土層採集一個混樣，總計六區 44 個樣品。採集之土樣進行 TPH 與重金屬檢測，其中 TPH 之檢測方法為環保署公告之標準方法 (NIEA S703.61B)，經溶劑萃取後以氣相層析質譜儀分析 TPH 濃度。至於重金屬分析則依照環保署公告之標準方法 (NIEA S361.63B) 進行，亦即以王水消化經前處理 (風乾、研磨與過篩) 之土樣，再以原子吸收光譜儀 (AA) 測定消化液中之重金屬含量。另外，除上述土壤樣品，本年度亦於每個試驗區各採集一個表土 (0~30cm) 混樣，進行土壤理化性質及 0.01M CaCl₂ 可交換性重金屬分析，總計 6 個樣品。

3.6 植物生理調查與採樣分析

本試驗植生復育之目的，在於利用植物對污染物之吸收、累積與降解機制，降低土壤中污染物之濃度。而一如前述，在污染區之土壤環境逆境中，植物能否正常生長，與其改善污染之功能有密切關係，本計畫所種植之木本植物白楊、構樹與血桐，草本植物太陽麻，在此特殊污染場址之生長狀況可藉由生育調查與生理試驗評析之。此外，為了解植物對污染之改善效果，除可藉由試驗區土壤採集與分析，並比較時間序列之變化外，重金屬部分亦可藉由植體分析，藉由對照區與處理區之濃度差異，得知植物對各元素之吸收累積量與土壤濃度之關係。亦可藉由植體中之重金屬含量與生質量估算移除量。其進行方法如下：

一、生育調查

由於白楊、構樹與血桐為多年生木本植物，故而其調查係定期丈量地上部之高度，其方式係測量地面至最高枝幹之生長點距離，本計畫執行期間預計進行四次。但因白楊樹栽種後第三年，株高多已超過 2.5 公尺，依前兩年之管理經驗，在颱風期間甚易造成毀損，故定期修剪使其高度控制於 2~2.5 公尺間，因此本年度之株高調查僅限於構樹與血桐，白楊則改為統計各區修剪後之枝葉重量(及生質量)；而太陽麻則因屬短期生長之草本植物，生長期約為 8~10 週，故係於收成時於每試驗區隨機選取 10 棵量測其株高與重量(濕重與乾重)，本年度預計執行二次。

二、生理調查

本項目係對白楊、構樹與血桐進行淨光合作用率及葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益(F_v/F_m)測定，計畫執行期間預計進行二次。眾所皆知，光合作用乃植物之重要生理作用，其效率足以代表植物生理狀況。測定方法為針對六個試驗區的植株，每區分別隨機選取 3 株，每株測定 2 片葉。測定時間為上午 7:30 至 10:30，使用之儀器為可控制環境條件的攜帶式光合作用測定系統(LI-6400, LI-COR, USA)，每個葉片測定的微環境為光量 $1500 \mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，葉箱內 CO_2 濃度控制在 $400 \mu\text{l L}^{-1}$ ，相對濕度 60~80%，葉溫控制在 28°C 。在此等固定條件下所得到的淨光合作用率數據，可比較白楊、構樹與血桐栽植在不同處理區的生理狀態。

其次，由於葉綠素為光合作用之胞器，故測定植株在暗適應後的最大光化學效益(maximal photochemical yield, F_v/F_m)可了解植物之健康狀況。本計畫係以攜帶式葉綠素螢光儀(Mini-PAM, Walz, Germany)測定之。暗適應處理過程係於測定

前先使用暗適應葉夾(dark leaf clip, DLC-8)將葉片遮蓋，進行暗適應 30 分鐘後，再以 Mini-PAM 測定葉片的最低螢光值(F_0)及最大螢光值(F_m)，由此可計算該葉片暗適應後之 F_v/F_m 值(其中 $F_v = F_m - F_0$)。在植物生理學上， F_v/F_m 代表光合系統 II 之最大光化學潛能，可用來當作植物是否遭受逆境之指標，供評估其健康狀態。

三、植體採樣分析

白楊、構樹與血桐於 8 月採集植體進行分析。採樣方法係於每個試驗區各選取二顆白楊，每顆樹分別於東、南、西、北採集枝葉並混合為一樣品，故每區有 2 個植體樣品，六區共計 12 個樣品；血桐與構樹亦依此方式採樣，故總計有 36 個木本植物樣品。而太陽麻則於收成後，於每試驗區隨機選取 10 棵，將每區植株之根與地上部分開，各區之根與地上部分別混合為一個樣品，每次共有 12 個樣品。另外，由於試驗區中之優勢草種牛筋草生長旺盛，甚至超過太陽麻，為了解其重金屬吸收能力，並評估做為復育植物之可行性，故而本年度亦於 BP、PR、CK 區分別採集一個混樣，採樣方式與太陽麻相同，共計採集 3 個樣品。各類植體樣品於烘乾、破碎後，以二酸消化法(濃硝酸：濃過氯酸=5：1)消化分解之，再以 AA 測定消化液中之重金屬含量，其重金屬種類則與土壤相同。

3.7 復育生物計量調查

由於蚯蚓與石化分解菌為 TPH 之主要降解者，在施放兩年餘後，兩者在污染土壤中之適應、繁殖與分佈，將可做為復育效益評析之參考。而本項計量調查將分蚯蚓與石化分解菌兩項分別執行：

一、蚯蚓計量調查

本項調查曾於第二、三年各進行一次，其方法係於三個生物復育區分別挖開兩個長、寬、深為 50x35x30 公分之土坑，將全部土壤置於塑膠盤中計數。本年度依照此方法調查，並進一步分二層(0~15、15~30) 觀察與計算其分佈情形。

二、石化分解菌計量調查

本項調查委託源資生物科技公司，並依循高雄師範大學生物科技系陳士賢、陳師慶、梁世雄等三教授，於 97 年度執行環境保護署委託之「以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術」計畫時所採用之方法(陳士賢等人，2008)。該計畫利用變性梯度膠體電泳(denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE)，以微生物的 16S rDNA 為標的，分析中油公司橋頭油庫具有分解石油碳氫化合物(petroleum hydrocarbons)的微生物，並用即時定量聚合酶測定法(Real-time polymerase chain reaction，簡稱 real-time PCR)分析與分解 BTEX (苯、甲苯，二

甲苯與乙苯) 有關的六種基因(*phe*、*rmo*、*nah*、*tod*、*tol* 和 *bph4*)，探討污染場址之生物降解可能性。此確認及定量石化分解菌之 real-time PCR 法可以分為 Real-time 和 PCR 兩部份，係藉由 PCR 的擴增原理，使極微量的 DNA 放大，並經由光學系統達到即時(Real-time)偵測的效果。每一次 PCR 擴增循環後，即記錄其生成反應產物之數量，待反應完成後，以循環數量(cycle number)和生成產物製作反應曲線圖，完整的呈現 PCR 反應中每一個循環產物的生成情形，所以稱為即時定量 PCR。

3.8 復育效益評析

本計畫於期末將以上述各項試驗之成果進行本污染場址之復育效益評析，其項目與方法分別為：

一、植物適應與復育成效評析

本計畫對白楊、構樹、血桐，及太陽麻所進行的生育調查與生理試驗結果，可以評析兩者在此場址特殊污染物環境下之生長適應狀況。可藉由對照區與處理區植體之重金屬差異，評析植物對各元素之吸收累積量與土壤濃度之關係。此外，亦可藉由植體中之重金屬含量與生質量估算移除量。

二、生物復育成效評析

如上所述，本計畫所施放之蚯蚓與分解菌對土壤中之 TPH 具有吸收、累積與降解的效果，藉以降低土壤中污染物之濃度。上述試驗區土壤之分期採集與 TPH 含量分析結果，即可由時間序列之變化評析其改善效果。此外，由於蚯蚓與石化分解菌，已施放三年餘，兩者在污染土壤中之適應、繁殖與分佈，亦可做為復育效益評析之參考。

3.9 預期完成之工作項目與進度

本計畫預期完成之工作項目與進度如下列甘特圖所示：

表 3-1 計畫工作項目與執行期程甘特圖

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備 註
試驗區除草													
						*						*	
蚯蚓培育與施放													
		*						*					
石化分解菌施灑													
		*						*					
土壤採樣													
								*					
土壤分析(污染物、理化 性質、交換態)											*		
植物培育管理													
						*						*	
木本植物生育調查													
		*								*			
木本植物生理試驗													
							*			*			
草本植物播種與收成													
				*					*				
植體修剪及採樣分析						*						*	
復育生物計量調查											*		
復育成效評析												*	
工作進度估計百分比 (累積數)	4	15	21	28	33	38	46	61	70	83	92	100	
預定查核點	期中		期中共完成一次除草、一次蚯蚓施放、一次石化分解菌接種、植物培育管理(視需要不定期施肥及病蟲害防治,至少一次)、一次草本植物播種與收成、一次植體採樣與分析,一次生育調查與生理試驗。										
	期末		期末共完成二次除草、二次蚯蚓施放、二次石化分解菌接種、一次土壤採樣與分析、植物培育管理(至少二次施肥及病蟲害防治)、二次木本植物生育調查與生理試驗、二次草本植物播種與收成、一次植體採樣與分析、一次復育生物計量調查、復育效益評析。										
說明：1.工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。 2.「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。 3.「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。													

3.10 污染防治及場址安全措施

針對整治施作時危害的預防，本計畫在現場工作執行前，擬定安全衛生管理計畫，並週知計畫相關人員，以減少危害發生的機率；且針對可能發生的危害狀況，制訂緊急應變計畫，執行人員於危害發生時，可依循應變計畫進行相關處置，以維護人員安全並減少損失；相關措施分述如下：

一、安全衛生管理計畫

安全衛生管理計畫主要依據勞工安全衛生法令之相關規定，主要部分包括確認安全基本事項、擬定安全衛生管理架構、制訂工作守則、實施安全衛生會議與教育訓練、實施與回報作業，以達到預防危害之目的。

1. 確認安全基本事項

除了基本的安全事項宣導外，由於不同類型的調查場址，可能存在的污染物種類均不相同，以本場址為例，可能的主要污染物包括有殘留態揮發性有機物(如苯、甲苯、二甲苯、乙苯、其他有機溶劑)、總石油碳氫化合物及重金屬等。在進場調查前，須使調查人員了解該場址可能存在的污染物種類、相關法規規定如土壤、地下水管制標準、勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準...等基本特性，並依規定建立目標污染物之安全物質資料表。

2. 擬定安全衛生管理架構

現場調查時，參與的人員較多，且調查作業牽涉之工項複雜，相關主持人應就其職掌與權責，落實執行安全衛生工作。一般而言，計畫主持人為安全衛生工作的總管理者，負責工程進度、工作安排、各單位協調等。並依需要另行指派安衛負責人協助安全衛生管理工作，並制訂安全衛生計畫、主導工地安全衛生計畫執行、研擬訂定安全防護等級、安全防護設備檢查...等，並隨時將安全衛生執行情形向計畫主持人報告。此外針對儀器設備維護、作業環境管理等工作，將指派專人執行，並明確告知其負責項目與內容，並將執行結果向主持人回報。

3. 制訂工作守則

計畫主持人應制訂工作守則，內容將包括安全觀念宣導、各項工作安全須知、設備安全檢查、防護器具配戴、警示裝置、急救設備檢查、罰則等。

4. 安全衛生會議與教育訓練

於現場工作開始前，計畫主持人應針對安全衛生管理計畫之內容進行說明，

確保工作人員均了解各項規定與權責。另每日工作開始前或必要時，亦應針對工作環境進行安全衛生等危害告知。

5.實施與回報作業

安全衛生管理計畫最重要的環節，即在於確實實施與檢查，唯有真正落實計畫內容，現場工作之安全才有保障，才不致淪為空談。無論是工作前的安全衛生講解與危害認識；進場前的設備檢查、防護器具檢查；工作中的重點巡查，均須徹底執行，如遇有突發狀況，應即時回報予計畫主持人，進行應變處置以降低危害之風險。

二、緊急應變計畫

緊急應變計畫其目的乃在建立一套因天然災害或施工過程，因操作疏失或意外所引起的緊急事故之應變能力適當的程序，使得危害發生時能採取適當的辦法，藉由各項事故發生的原因和機率的瞭解，進一步積極地預防緊急事故的發生，以降低災變對人員、設備和環境的危害。

為確定緊急事故發生時，能迅速進行處理，避免災害擴大，調查人員應於工作進行前規劃緊急應變小組，並訓練人員熟悉各項流程，各類人員執掌如下：

- 負責人：負責緊急應變計畫執行與緊急應變訓練，現場緊急事故判定與管理，立即於緊急事故發生時及時通報計畫主持人(緊急事故之通報應於 2 小時內完成)。
- 急救人員：負責急救設備之準備、保管與定位，同時負責緊急事故發生後對人員必要的急救措施。
- 現場控制人員：負責緊急事故發生後，現場工作人員集合與清點，並對現場實施管制，必要時疏散附近居民。
- 連絡人員：負責聯絡警察局、醫院、消防隊等相關單位，同時協調救護、滅火、醫療等事項。
- 運送人員：負責運送人員與購買所需物品之一切交通運輸工作。
- 支援人員：現場待命，由負責人統一指揮調度。

本計畫將訓練工作人員於發生緊急事故之應變程序，以利各項救援進行，並事先建立鄰近之警察局、醫療院所與消防隊之聯絡電話，與各緊急應變通報單位之相對位置與運輸路線。

三、二次污染防治計畫

污染復育工作進行時，若不當處理時，將可能造成二次污染之產生。本計畫提出之二次污染防治計畫，對於執行期間可能發生之污染問題有效防治，避免二次污染之發生。

1.空氣污染防治

由於本場址污染物並非揮發性有機物，執行期間對於鄰近地區空氣品質之影響主要來自整地工程，整地時可能造成之粒狀污染物飛揚情形，應配合灑水等防治措施，以免影響周遭環境。本場址之整地工作已於第一年完成，本年度無此項工作規劃，故無此問題。

2.噪音與振動污染防治

本年度計畫之執行全為人工方式，並無高噪音設備之使用，故無噪音與振動污染之虞。

3.水污染防治

本計畫並無產生污水之行為，植生復育所需使用的澆灌水，係引自鄰近民井，且計畫進行中環保局亦持續進行地下水監測。

4.固體廢棄物清理

本計畫所產生之固體廢棄物以清除之雜草、收成之太陽麻與修剪之白楊樹枝葉為最大宗，歷年來皆委由清潔隊運至崁頂焚化廠妥善處理，故無污染環境之虞，本年度亦將比照辦理。

3.11 章節摘要

本計畫以公告污染場址為範圍，依據歷次調查結果及本計畫執行期間整地時所發現之廢油桶堆置及掩埋區，規劃六個試驗區，其中 CK 代表無污染之對照區，其餘五區為處理區，而 BP1、BP2 及 BP3 代表同時進行生物與植生復育之處理區，PR1 與 PR2 則為進行植生復育之處理區。計畫之試驗項目與內容為：(1) 試驗區管理：包括定期進行澆水、除草、施肥與病蟲害防治，以提供植物與分解生物妥適之生存環境，使發揮污染物降解效果。(2) 生物復育試驗施作：施放蚯蚓與石化分解菌並提供妥適之活動環境，以達降解 TPH 之目的。(3) 植生復育試驗施作：管理第一年栽種之白楊與 103 年度栽植之構樹與血桐，並種植太陽麻，以達到改善 TPH 與重金屬污染之目的。(4) 土樣採集與分析：採集土壤進行 TPH 與重金

屬含量分析，藉以評析改善效益。(5) 植物生理調查與採樣分析：進行白楊、構樹、血桐、太陽麻及牛筋草之生育調查與生理試驗，且採集植體進行重金屬含量分析，藉以評析改善效益。(6) 復育效益評析：依土壤分析、植體分析、植物生育調查與生理試驗、蚯蚓與石化分解菌計量調查結果評析復育效益。

第四章、結果與討論

本計畫之試驗內容包括試驗區管理、生物復育試驗施作、植生復育試驗施作、土樣採集與分析、植物生理調查與採樣分析、復育效益評析等，本年度執行內容與成果依序說明如下。

4.1 試驗區管理

本項工作包括定期進行澆水、除草、施肥與病蟲害防治，以提供植物與分解生物妥適之生存環境，使發揮污染物降解效果。

一、澆水

本試驗聘僱廖偉志先生，每天依天候與植物生長情況調整自動噴灑設施之澆水時間，且依現場噴灑均勻度進行必要之人工補灑，使土壤水分維持於適當含水量範圍，提供植物與分解生物最佳之水分條件。表 4-1 為採集土樣所測得各試驗區土壤之水分含量，多可維持於 20% 以上。

二、除草

由於屏東縣之氣候與環境條件極易蔓生雜草，故本計畫皆視雜草與試驗植物之生長狀況定期聘僱工人加以清除，以維持場址之妥適試驗環境。

三、施肥與病蟲害防治

本計畫為使試驗植物獲得足夠之養分，已於 103 年 12 月 28 日栽植第一期太陽麻並在 104 年 1 月 8 日予以施肥，此時白楊因處於落葉狀態而未施用。自四月中旬起，白楊陸續長出新葉，故而分別於 4 月 9 日、5 月 20 日進行追施，以充分供應植物與分解生物之養分，施用肥料種類為台塑 6 號高氮速效配方肥料(全氮 6.0%、全磷酐 4.0%、全氧化鉀 3.0%、檸檬酸溶性氧化鎂 1.3%、有機質 55%)。此外，雖然構樹與血桐較少病蟲害，然而白楊易感染鏽病，且與太陽麻皆易滋生病蟲害，其中常見之蟲害包括斜紋夜盜、豆莢螟、小綠葉蟬、擬尺蠖、蚜蟲、臺灣黃毒蛾及番茄斑潛蠅等，因此隨時視病癥諮詢屏東科技大學植物醫學系，進行適時適量之噴藥予以防治，本期已分別於 1 月 17 日、4 月 26 日、6 月 6 日及 27 日進行四次噴藥防治，確保所有復育植物生長良好。

表 4-1 各試驗區土壤水分含量

編號	含水率 (%)	編號	含水率 (%)	編號	含水率 (%)
BP1-1-30	24.4	BP2-1-30	19.5	BP3-1-30	24.9
BP1-1-60	28.9	BP2-1-60	20.8	BP3-1-60	26.4
BP1-1-100	35.6	BP2-1-100	21.5	BP3-1-100	26.0
BP1-1-120	37.0	BP2-1-120	23.1	BP3-1-120	21.6
BP1-2-30	23.2	BP2-2-30	18.8	BP3-2-30	27.9
BP1-2-60	24.2	BP2-2-60	19.3	BP3-2-60	27.4
BP1-2-100	39.1	BP2-2-100	26.8	BP3-2-100	24.4
BP1-2-120	29.3	BP2-2-120	36.3	BP3-2-120	23.8
編號	含水率 (%)	編號	含水率 (%)	編號	含水率 (%)
PR1-1-30	35.8	PR2-1-30	22.0	CK-1-30	16.5
PR1-1-60	37.3	PR2-1-60	20.6	CK-1-60	18.1
PR1-2-30	32.0	PR2-1-100	23.1	CK-1-100	19.0
PR1-2-60	33.4	PR2-1-120	22.3	CK-1-120	21.4
		PR2-2-30	31.5	CK-2-30	21.7
		PR2-2-60	33.3	CK-2-60	21.5
		PR2-2-100	23.3	CK-2-100	22.2
		PR2-2-120	19.1	CK-2-120	21.4

4.2 生物復育試驗施作

本試驗規劃於執行期間在 BP1、BP2 及 BP3 等三個生物復育區分別施放蚯蚓及施灑分解菌各二次，其中蚯蚓與分解菌已於 103 年 12 月 26 日及 104 年 7 月 4 日施放及施灑。每一區塊施放蚯蚓之數量為 5.4 公斤，施放時先將試驗區土壤進行鬆土並挖掘施放溝(圖 4-1 上)，待植入蚯蚓並拌入米糠後進行覆土，其後定期澆水與施用有機肥以提供蚯蚓較佳之生長環境。為了解蚯蚓之生長與分布情形，本年度於 104 年 1 月 29 日及 104 年 8 月 4 日進行 2 次計量調查(圖 4-1 下)。其方法係於三個生物復育區分別挖開兩個長、寬、深為 50x35x30 公分之土坑，將全部土壤置於塑膠盤中計數，其平均密度約為每平方公尺 61 隻，且都集中於 0~15 公分，顯示施放之蚯蚓在表土層的生長狀況良好。

至於石化分解菌係先於實驗室培養後運送至現場，每一區塊施灑約 20 公升之培養液，均勻施灑於試驗區中，並於施用後定期灑水及提供營養鹽使微生物有較佳之生長環境，以利其降解作用。為了解植入菌種之生長情形，本年度也同時採集上述蚯蚓調查坑之土壤，委託源資國際生物科技公司進行石化分解菌之鑑定。分類結果顯示，在本場址之土壤樣品中總計鑑別出 20 門，358 屬菌種，而植入之分解菌佔全部菌種數之 1.7%，由此結果可知，分解菌確能耐受本場之污染環境，進而發揮降解效果。



圖 4-1 生物復育區施放蚯蚓(上)及計量調查(下)作業

4.3 植生復育試驗施作

本計畫第一年(101年)已於試驗場址中栽種 350 棵白楊。各試驗區依面積大小所栽植之數量分別為 CK 25 棵，BP1 及 BP2 各 12 棵，BP3 為 10 棵，PR1 為 9 棵，PR2 為 18 棵。此外，太陽麻栽植係於六個試驗區內進行，平均每平方公尺約有 150 棵，生長期約為 8~10 週。而為篩選優良本土復育植物，103 年於白楊樹間(間距 2.5 m)栽種構樹與血桐，每試驗區各 3 顆；並在太陽麻外加種田青，兩者採輪植方式栽植，期末評析與比較各植物之復育效果。本(104)年度持續管理白楊樹、構樹與血桐，而由於 103 年之評析結果發現田青之復育效益不佳，故本年度以播種太陽麻為主，且一併評析現地優勢草種牛筋草之復育能力。

本年度在復育植物管理方面發現，構樹與血桐的生長情況良好(圖 4-2)；白楊則自 103 年 11 月中旬起葉片開始轉黃並逐漸掉葉，至 2 月初全部落葉，此期間呈現休眠狀態，對污染物之吸收亦可能減緩或停頓，且無植體可供採集與分析。至 104 年 4 月中旬起陸續長出新葉，之後即快速成長且分櫟眾多，故於 8 月 4 日加以修剪並採集植體枝葉進行植體重金屬分析，此外，也對修剪枝葉秤重，以評析復育效益。此期間血桐及構樹之生長狀況如圖 4-2 所示，而白楊則如圖 4-3。



圖 4-2 血桐(左)與構樹(右)之生長狀況

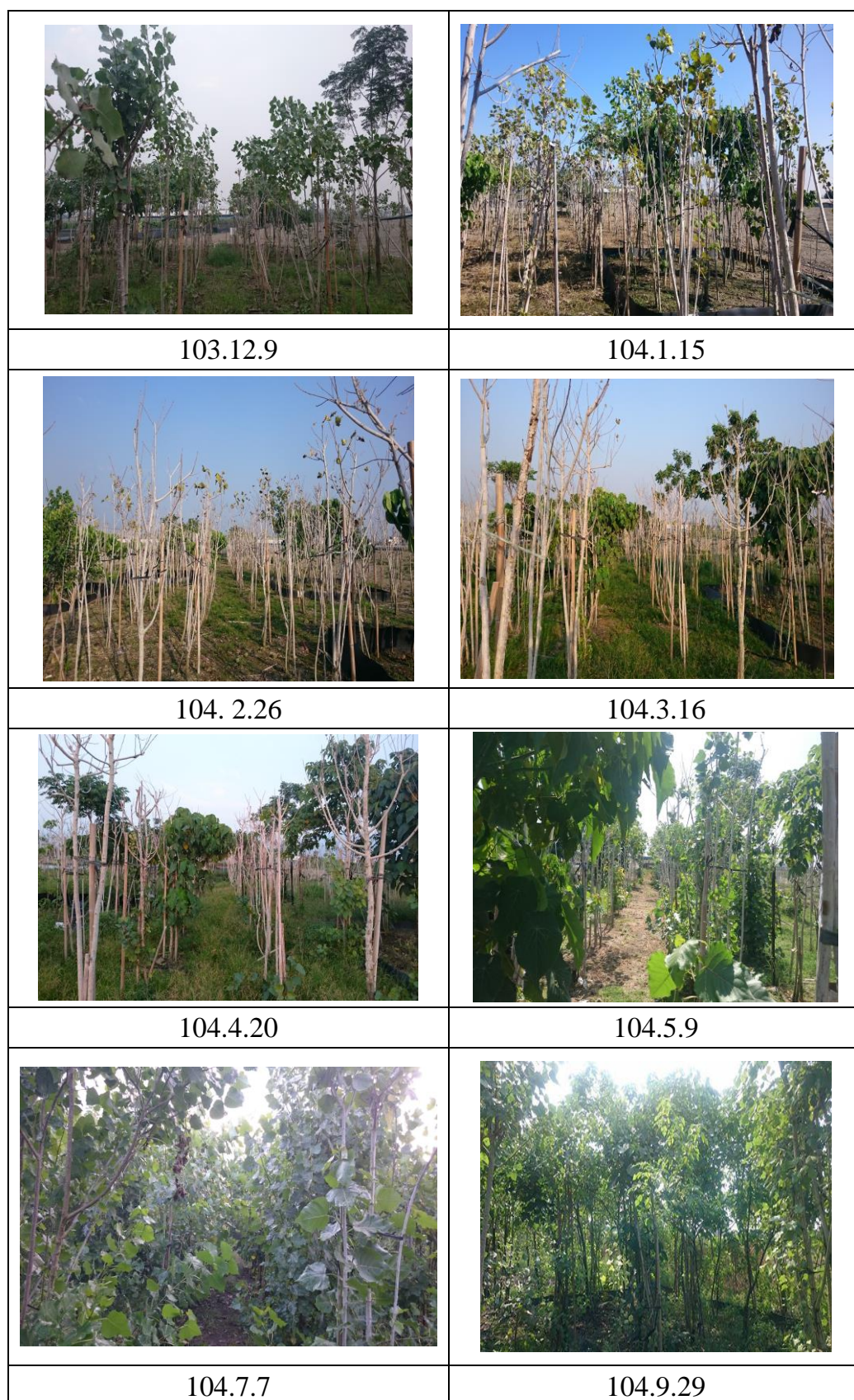


圖 4-3 白楊之生長狀況

至於太陽麻部分，本年度於 103 年 12 月 28 日執行第一期播種，但因低溫導致萌芽率過低且黃化，故於 2 月 8 日再進行第二次播種。並於 4 月 9 日收成且採樣分析。其後再於 4 月 25 日進行播種第二期太陽麻，而於 7 月 1 日採樣。此外，如前所述，本年度因發現自然演替後之優勢草種牛筋草生長情況甚佳，故亦採集其植體並分析重金屬含量，進而評估做為復育植物之可行性。收成之兩期太陽麻與牛筋草分別如圖 4-4 所示。本期修剪之木本植物枝葉與收成之草本植體皆裝袋送至崁頂焚化爐進行焚化處理，且於每試驗區隨機選取 25 枝木本植物枝葉，以分析重金屬；選取 10 棵太陽麻做為生育調查及重金屬分析之用；牛筋草則分別於 BP、PR 及 CK 區各選取 10 叢做為調查及分析用。

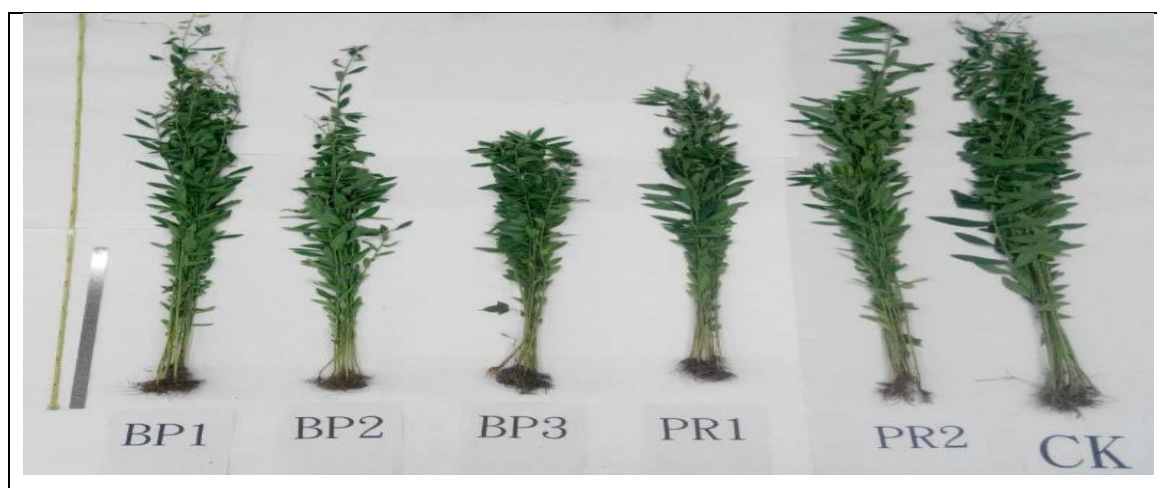
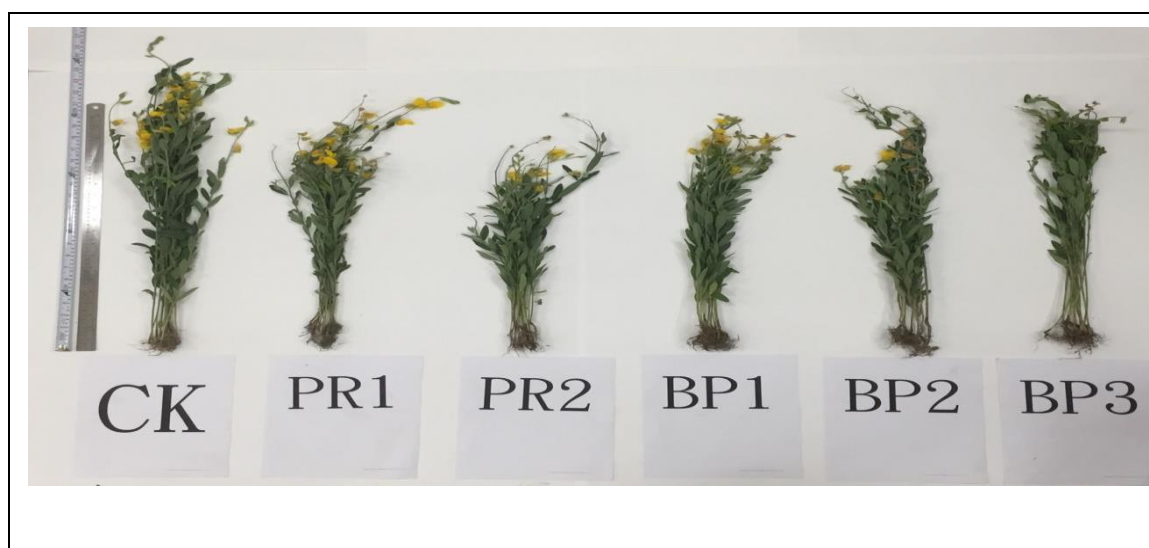




圖 4-4 收成之太陽麻(上、中)與牛筋草(下)

4.4 土樣採集與分析

本計畫執行生物或植生復育試驗之目的，皆為整治土壤中之污染物。為了解其改善效果，本年度於 104 年 7 月 3 日採集土壤並進行污染物(TPH、Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni)分析，並與歷次分析值比對以評析成效，其分析結果如下：

一、土壤 TPH 分析結果

本計畫第一年經移除地上廢棄物與整地後，於 101 年 5 月 15 日開始執行生物復育，其後自 5 月 22 日起定期採集土壤樣品分析總石油碳氫化合物含量，初期之採樣深度為 0~100 公分，後來自 102 年 2 月起增採 120 公分土樣加以檢測。其分析結果列於表 4-2，表中所列之數據為前兩年與去年度兩次採樣之測值，藉以觀察其濃度變化趨勢。由分析結果發現，在生物復育區之 TPH 濃度多呈現 BP3 > BP1 > BP2 之趨勢，而植生復育區之濃度則有 PR2 略大於 PR1 之現象，且皆遠高於對照區之測值，顯見此場址之污染為污染行為人不當處理廢機油所致。各樣區之 TPH 不僅累積於表層，其深度可達 120 公分。而經三年之復育後，各復育區之 TPH 多有不同程度之降低，以各區之最高濃度而言，BP1 由 69,074 mg/kg (BP1-30)減至 21,869 mg/kg (BP1-100)，BP2 由 14,878 mg/kg (BP2-100)降至 13,900 mg/kg (BP2-30)，BP3 由 169,375 mg/kg (BP3-100)降至 75,832 mg/kg (BP3-60)，PR1 由 28,260 mg/kg (PR1-30)減至 20,800 mg/kg (PR1-30)，PR2 由 73,661 mg/kg (PR2-100)減至 56,299 mg/kg (PR2-100)。

再就各復育區之同一深度土層觀之(表 4-2 及圖 4-5~圖 4-9)，三個生物復育區 (BP1~BP3) 之 TPH 濃度隨著時間雖仍有高低不規則之變化，但多數呈現降低趨勢，除部分土層可能因為土壤之非均質性 (heterogeneous) 而出現濃度不減

反增之現象外，其餘土層之減量百分比介於 33%~97%，各區之改善效果相當。至於植生復育區（PR1 及 PR2）之濃度變化趨勢亦與生物復育區類似，呈現逐漸降低之趨勢，減量百分比為 19%~81%。惟因本場址之污染甚嚴重，且又為較難分解之高碳數碳氫化合物，故雖經三年餘之復育，大多數土層之 TPH 濃度仍高於土壤污染管制標準。

綜上所述，在三年餘的整治試驗過程中，植生與生物兩種復育方法似乎對 TPH 都有不同程度的改善效果，惟由於試驗時間不長，無論是蚯蚓、分解菌或植物之活動範圍與期程仍屬有限，且未施放蚯蚓與分解菌之 PR 區亦有類似 BP 區之減量現象，故本計畫處理因素外之自然降解因素亦可能為濃度降低之原因。此外，因土壤屬非均質性物質，雖然每次在同一採樣點進行土樣採集時皆盡量靠近，但非均質性所可能導致之濃度高低變化相當明顯，甚或出現濃度不減反增之現象，如 BP2-30 及 BP2-60 之增量百分比分別為 34%及 18%，說明非均質性對改善效果之評估有其盲點，未來仍須長期且持續之試驗以驗證其改善效果。

表 4-2 試驗區土壤總石油碳氫化合物監測結果

採樣時間	5/22/101	12/12/101	2/4/102	8/1/102	12/27/102	7/16/103	7/4/104	減量百分比
分析方法	NIEA S703.61B							
濃度單位	mg/kg							%
BP1-30	69074	1510	974	18361	8473	5847	1765	97
BP1-60	60939	2618	3171	19936	3660	10213	2240	96
BP1-100	42009	30280	730	11493	25600	44551	21869	48
BP1-120	---	---	26539	23685	20804	27773	10240	61
BP2-30	10380	315	351	442	8501	10608	13900	+34
BP2-60	764	ND	543	384	9961	5494	905	+18
BP2-100	14878	3579	1658	101	5220	9861	5119	66
BP2-120	---	---	25992	180	2846	2458	5866	77
BP3-30	76524	82542	69831	73560	8920	15143	12582	84
BP3-60	151021	118805	33683	7109	14412	44363	75832	50
BP3-100	169375	88566	31083	2337	10958	12187	20832	88
BP3-120	---	---	11819	274	11856	24196	7921	33
PR1-30	28260	7183	20712	7192	18073	13310	20800	26
PR1-60	9756	11904	---	161739	4556	24083	7871	19
PR2-30	65827	45699	24809	6816	5069	11192	12178	81
PR2-60	23476	11602	73247	8482	3052	525	6008	74
PR2-100	73661	3921	14	205	3186	15045	56299	24
PR2-120	---	---	3500	656	3637	5010	1440	56
CK-30	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-60	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-100	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-120	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
偵測極限	15							
土污管制標準	1000							

註: 1. 檢測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

2. ---表未採樣而無分析值

3. 減量百分比(%) = [(第一次測值 - 最後一次測值) / 第一次測值] * 100 ;

正值表濃度不減反增

4. ※表檢測值皆低於土壤污染管制標準而未計算減量百分比

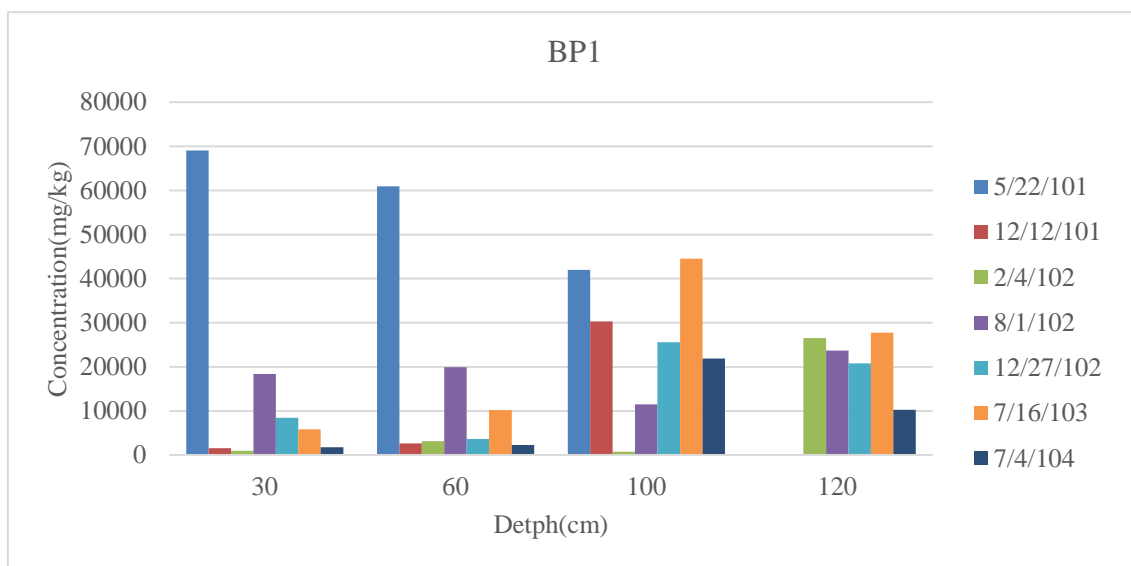


圖 4-5 生物復育區 BP1 之 TPH 濃度變化

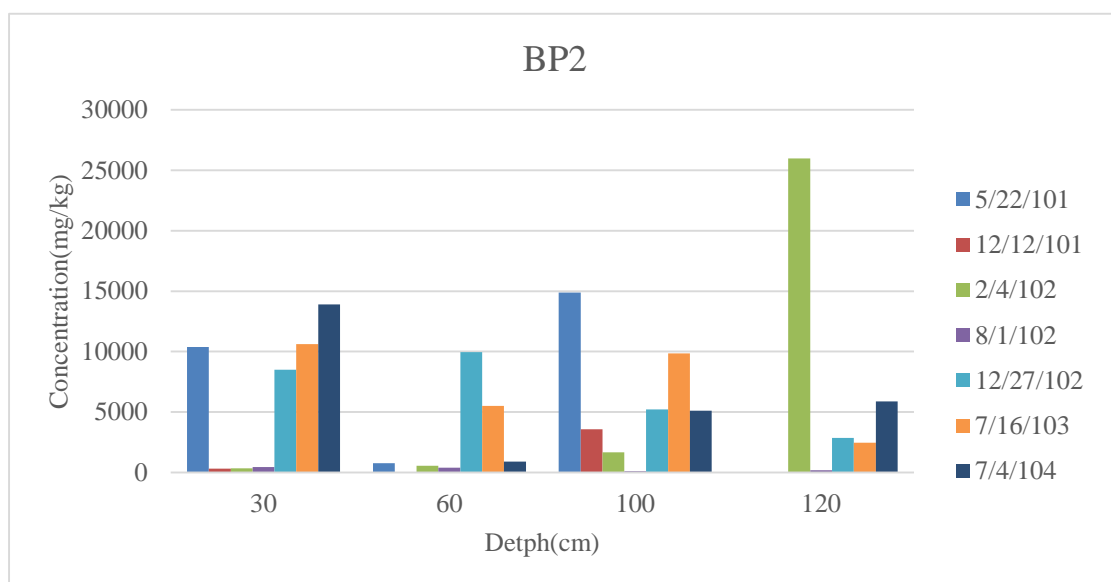


圖 4-6 生物復育區 BP2 之 TPH 濃度變化

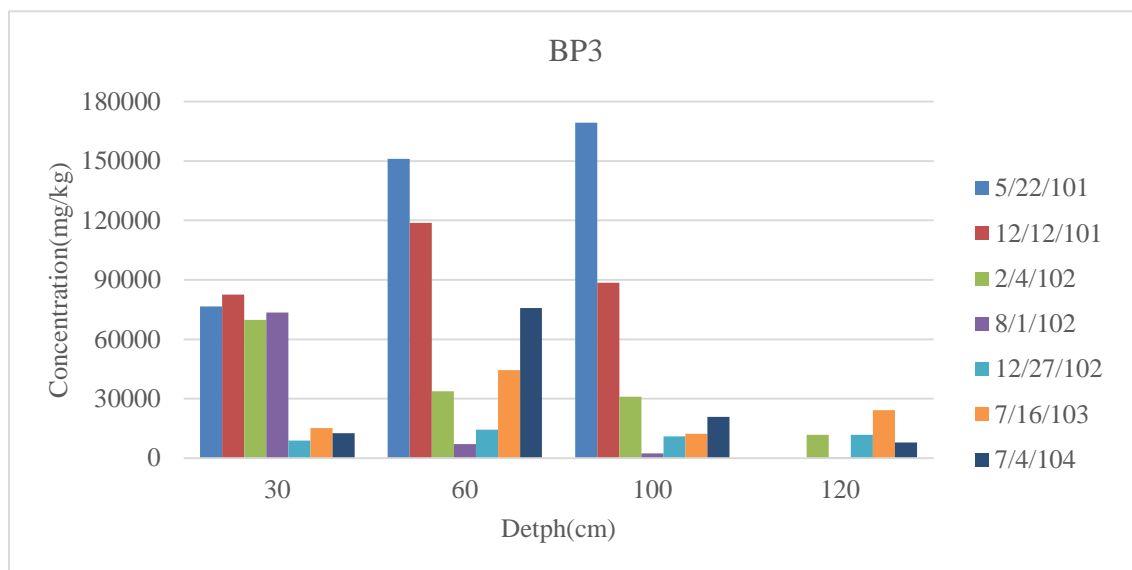


圖 4-7 生物復育區 BP3 之 TPH 濃度變化

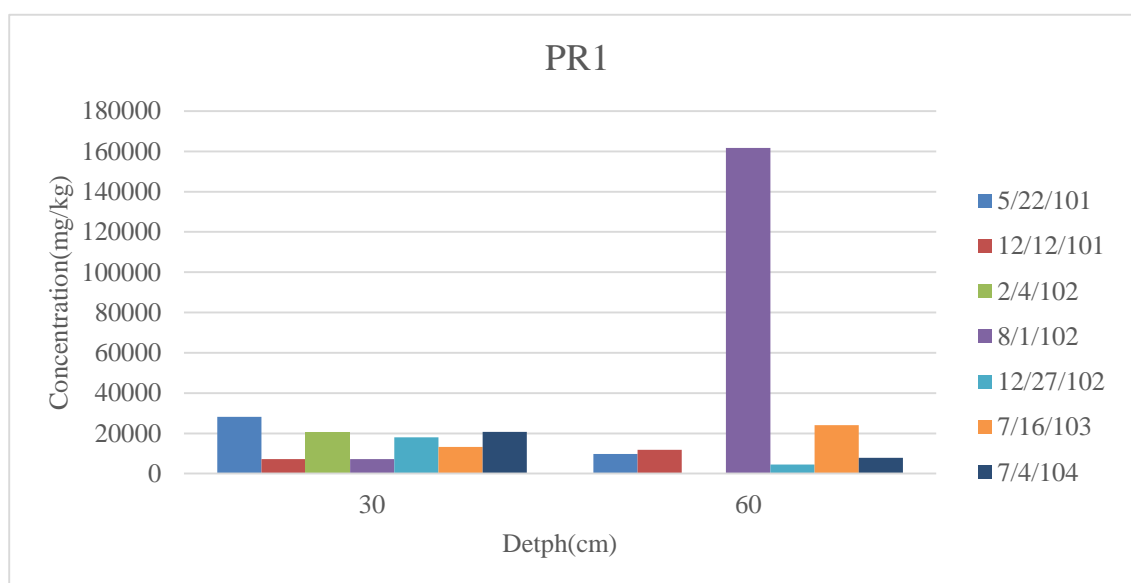


圖 4-8 植生復育區 PR1 之 TPH 濃度變化

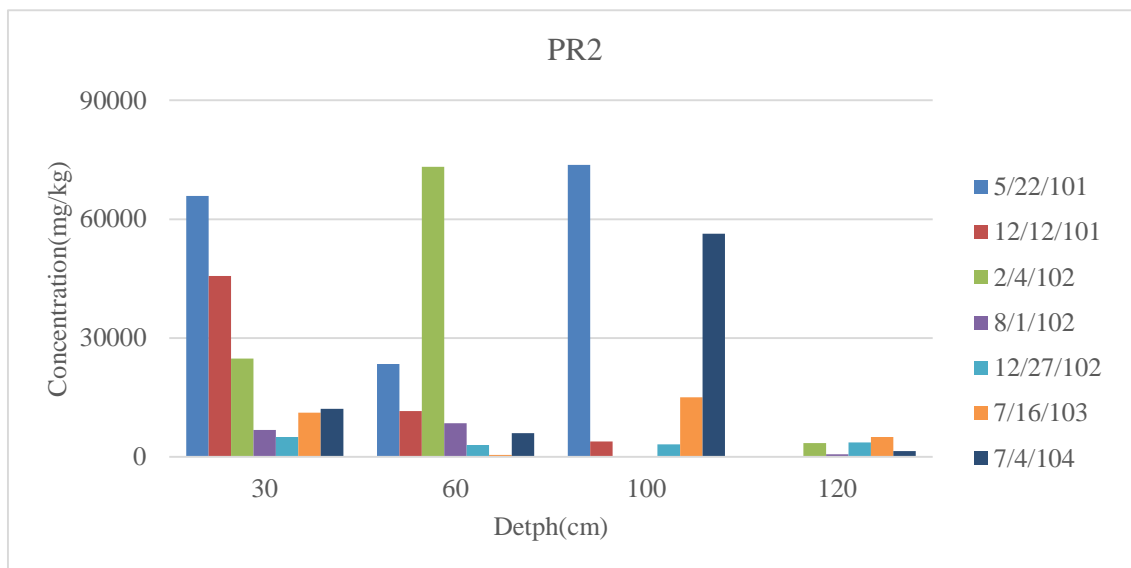


圖 4-9 植生復育區 PR2 之 TPH 濃度變化

二、土壤重金屬分析結果

本計畫第一年於場地整理並設立試驗區後(101 年 5 月)，對六個試驗區所進行之第一次土壤重金屬分析結果列於表 4-3，可做為場址土壤重金屬之背景參考值。第二年則於期初(102 年 2 月)與期末(102 年 8 月)各採集一次土樣進行檢測，此二次土樣之重金屬檢測結果分別列於表 4-4 與表 4-5。103 年度期初(102 年 12 月 27 日)與期末(103 年 7 月 16 日)與今年(104 年 7 月 2 日)所採土樣之檢測結果分別列於表 4-6~表 4-8。由各元素之六次測值可知，本場址五個復育區之主要污染物皆為 Zn、Cr、Cu、Ni，其中以 Zn 之濃度最高，其餘則依序為 Cr、Cu、Ni。四種重金屬含量超過土壤污染管制標準者甚多，且污染物不僅累積於表層土壤，其深度皆可達 120 公分。至於對照區之測值則皆遠低於土壤污染管制標準，屬一般正常土壤之含量。此結果與各環保單位之歷次調查結果相符。

由於重金屬與 TPH 分析土壤為分樣樣品，比較表 4-2 與表 4-3~表 4-9 之測值發現，在生物復育區 TPH 污染物之濃度多呈現 BP3>BP1>BP2 之趨勢，重金屬亦呈現類似趨勢，植生復育區之濃度則有 PR1 略大於 PR2 之現象，且皆遠高於對照區之測值，顯見兩污染物皆為污染行為人不當處理廢機油所致。此外，多數淺層土之濃度亦有高於深層土之跡象，此乃污染源來自地表作業與廢液排放，加上土壤對污染物之吸持性(retention)所致。

比較表 4-3~表 4-8 中同一採樣點各重金屬之六次分析值，可藉以評估三年度植生復育之重金屬污染改善效果。由於比對之數據甚多且無規則之變化趨勢，故僅將主要污染重金屬（Zn、Cr、Cu、Ni）在各採樣點之六次分析值加以平均並彙整於表 4-9，再據以繪製各試驗區之土壤重金屬濃度變化趨勢圖（圖 4-10）。由表或圖之資料顯示，各污染重金屬之濃度在計畫執行前後呈現不規則變化，且大多數仍高於土壤污染管制標準，顯見在此高污染場址中，植生復育對重金屬污染之短期改善效果十分有限，此論點可參考 4.6 節之復育效益評析。而重金屬之六次分析值呈現不規則變化之現象，應該也是土壤之非均質性所致。

表 4-3 101 年 5 月各試驗區土壤重金屬分析結果

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
BP1-1-30	223	<u>2.91×10⁴</u>	N.D.	<u>330</u>	<u>478</u>	<u>476</u>
BP1-1-60	138	<u>3.62×10⁴</u>	N.D.	<u>476</u>	<u>780</u>	<u>1030</u>
BP1-1-100	139	<u>4.12×10⁴</u>	N.D.	<u>535</u>	<u>953</u>	<u>1293</u>
BP1-2-30	76.6	<u>1.70×10⁴</u>	N.D.	<u>283</u>	<u>612</u>	<u>406</u>
BP1-2-60	93.3	<u>4.59×10⁴</u>	N.D.	<u>576</u>	<u>990</u>	<u>1133</u>
BP1-2-100	87.9	<u>4.49×10⁴</u>	N.D.	<u>506</u>	<u>943</u>	<u>940</u>
BP2-1-30	45.2	<u>5670</u>	N.D.	105	158	175
BP2-1-60	72.7	<u>6150</u>	N.D.	103	151	225
BP2-1-100	65.0	<u>6810</u>	N.D.	114	173	209
BP2-2-30	47.1	<u>8810</u>	N.D.	153	<u>301</u>	175
BP2-2-60	127	<u>3.56×10⁴</u>	N.D.	<u>396</u>	<u>714</u>	<u>538</u>
BP2-2-100	137	<u>3.92×10⁴</u>	N.D.	<u>462</u>	<u>788</u>	<u>604</u>
BP3-1-30	78.1	<u>3.01×10⁴</u>	N.D.	<u>433</u>	<u>1016</u>	<u>582</u>
BP3-1-60	92.0	<u>2930</u>	N.D.	<u>426</u>	<u>1076</u>	<u>546</u>
BP3-1-100	94.1	<u>3.12×10⁴</u>	N.D.	<u>477</u>	<u>1206</u>	<u>580</u>
BP3-2-30	52.0	<u>8100</u>	N.D.	<u>367</u>	<u>528</u>	233
BP3-2-60	55.6	<u>9780</u>	N.D.	<u>311</u>	<u>674</u>	257
BP3-2-100	23.8	645	N.D.	34.0	59.2	35.4
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	0.033	0.033	0.033	0.023	0.100	0.433

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-3 (續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
PR1-1-30	169	<u>5.60×10⁴</u>	N.D.	<u>1206</u>	<u>4361</u>	<u>1236</u>
PR1-1-60	86.9	<u>4.66×10⁴</u>	N.D.	<u>947</u>	<u>3928</u>	<u>1120</u>
PR1-1-100	59.2	<u>1.31×10⁴</u>	N.D.	<u>209</u>	<u>550</u>	380
PR1-2-30	42.1	<u>7260</u>	N.D.	130	246	238
PR2-1-30	51.8	<u>1.13×10⁴</u>	N.D.	195	<u>655</u>	234
PR2-1-60	49.6	<u>9110</u>	N.D.	141	<u>306</u>	186
PR2-1-100	28.4	1347	N.D.	117	56.2	44.5
PR2-2-30	90.9	<u>4.23×10⁴</u>	1.50	<u>528</u>	<u>853</u>	<u>1393</u>
PR2-2-60	53.5	<u>1.76×10⁴</u>	0.367	<u>206</u>	<u>423</u>	<u>616</u>
PR2-2-100	39.6	<u>3900</u>	0.133	81.0	185	128
CK-1-30	27.4	165	N.D.	22.4	23.2	31.5
CK-1-60	28.0	154	N.D.	22.7	24.6	32.4
CK-1-100	26.5	144	N.D.	22.3	22.2	30.6
CK-2-30	25.2	88	N.D.	19.9	18.2	23.2
CK-2-60	25.8	86	N.D.	23.3	20.2	25.4
CK-2-100	24.8	83	N.D.	20.6	19.4	23.5
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	0.033	0.033	0.033	0.023	0.100	0.433

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-4 102 年 2 月各試驗區土壤重金屬分析結果

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
BP1-1-30	105	<u>2.21×10⁴</u>	1.64	<u>302</u>	<u>666</u>	<u>442</u>
BP1-1-60	133	<u>2.45×10⁴</u>	1.73	<u>405</u>	<u>1930</u>	<u>578</u>
BP1-1-100	59.7	<u>1.61×10⁴</u>	1.31	176	<u>239</u>	291
BP1-1-120	75.8	<u>2.66×10⁴</u>	1.83	<u>308</u>	<u>438</u>	337
BP1-2-30	83.6	<u>2.0×10⁴</u>	1.73	<u>304</u>	<u>811</u>	<u>420</u>
BP1-2-60	77.2	<u>1.97×10⁴</u>	1.21	<u>298</u>	<u>726</u>	<u>411</u>
BP1-2-100	129	<u>4.16×10⁴</u>	2.08	<u>591</u>	<u>1130</u>	<u>1080</u>
BP1-2-120	129	<u>4.02×10⁴</u>	2.05	<u>608</u>	<u>1180</u>	<u>1180</u>
BP2-1-30	100	<u>3640</u>	1.54	<u>298</u>	<u>447</u>	<u>470</u>
BP2-1-60	91.6	<u>1.06×10⁴</u>	1.42	148	193	276
BP2-1-100	57.4	<u>3050</u>	<0.67	71.0	52.6	121
BP2-1-120	40.8	1500	<0.67	53.7	43.4	74.1
BP2-2-30	40.5	<u>3150</u>	0.77	89.0	124	102
BP2-2-60	76.4	<u>8650</u>	0.87	150	<u>254</u>	254
BP2-2-100	221	<u>3.95×10⁴</u>	2.19	<u>615</u>	<u>1560</u>	<u>938</u>
BP2-2-120	439	<u>4.03×10⁴</u>	2.39	<u>534</u>	221	<u>780</u>
BP3-1-30	89.3	<u>5.22×10⁴</u>	3.34	<u>722</u>	<u>1430</u>	<u>1240</u>
BP3-1-60	89.2	<u>1.74×10⁴</u>	1.52	<u>304</u>	<u>934</u>	<u>676</u>
BP3-1-100	40.4	<u>2750</u>	0.77	78.6	124	138
BP3-1-120	33.1	1850	<0.67	55.0	80.6	102
BP3-2-30	153	<u>2.73×10⁴</u>	2.37	<u>756</u>	<u>7120</u>	<u>895</u>
BP3-2-60	112	<u>1.82×10⁴</u>	1.73	<u>532</u>	<u>2420</u>	<u>577</u>
BP3-2-100	48.6	<u>2360</u>	0.78	149	<u>463</u>	149
BP3-2-120	37.0	1880	<0.67	92.1	200	81.3
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	4.10	0.62	0.26	1.22	1.30	0.88

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-4 (續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
PR1-1-30	125	<u>1.23×10⁵</u>	2.41	<u>974</u>	<u>914</u>	<u>1630</u>
PR1-2-30	201	<u>4.34×10⁴</u>	2.17	<u>611</u>	<u>899</u>	<u>904</u>
PR1-2-60	55.6	<u>6100</u>	0.98	112	<u>608</u>	240
PR2-1-30	74.6	<u>3.71×10⁴</u>	2.39	<u>509</u>	<u>1020</u>	<u>1500</u>
PR2-1-60	81.7	<u>4.89×10⁴</u>	3.02	<u>595</u>	<u>605</u>	<u>2460</u>
PR2-1-100	38.8	<u>3200</u>	0.99	86.9	65.4	166
PR2-1-120	34.8	1540	0.77	60.9	43.1	87.9
PR2-2-30	94.0	<u>3.30×10⁴</u>	2.72	<u>626</u>	<u>3540</u>	<u>798</u>
PR2-2-60	159	<u>3.92×10⁴</u>	2.37	<u>632</u>	<u>4050</u>	<u>818</u>
PR2-2-100	63.2	<u>1.80×10⁴</u>	1.20	<u>214</u>	<u>539</u>	290
PR2-2-120	46.4	<u>5700</u>	0.88	128	<u>278</u>	171
CK-1-30	34.7	190	<0.67	38.0	24.2	43.5
CK-1-60	31.4	145	<0.67	36.0	24.0	32.6
CK-1-100	21.6	79.9	<0.67	34.6	19.4	22.8
CK-1-120	26.9	93.1	<0.67	36.1	10.4	25.7
CK-2-30	31.4	152	<0.67	33.9	23.5	28.6
CK-2-60	30.9	97.5	<0.67	36.4	21.5	27.4
CK-2-100	27.3	81.3	<0.67	36.2	19.4	24.0
CK-2-120	25.2	124	<0.67	34.4	19.3	23.5
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	4.10	0.62	0.26	1.22	1.30	0.88

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-5 102 年 8 月各試驗區土壤重金屬分析結果

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
BP1-1-30	115	<u>2.88×10⁴</u>	0.90	<u>347</u>	<u>493</u>	<u>508</u>
BP1-1-60	73.4	<u>2.05×10⁴</u>	<0.67	<u>218</u>	<u>321</u>	<u>325</u>
BP1-1-100	78.6	<u>3.84×10⁴</u>	0.77	<u>368</u>	<u>520</u>	537
BP1-1-120	88.3	<u>2.79×10⁴</u>	<0.67	<u>341</u>	<u>571</u>	522
BP1-2-30	50.8	<u>7330</u>	N.D	139	<u>262</u>	<u>202</u>
BP1-2-60	50.5	<u>1.69×10⁴</u>	<0.67	<u>209</u>	<u>441</u>	<u>331</u>
BP1-2-100	57.4	<u>1.18×10⁴</u>	N.D	<u>213</u>	<u>400</u>	<u>287</u>
BP1-2-120	69.0	<u>2.11×10⁴</u>	<0.67	<u>3287</u>	<u>615</u>	<u>438</u>
BP2-1-30	61.7	<u>1.24×10⁴</u>	<0.67	<u>211</u>	<u>457</u>	<u>295</u>
BP2-1-60	60.9	<u>1.99×10⁴</u>	N.D	<u>245</u>	<u>566</u>	420
BP2-1-100	54.3	<u>9060</u>	N.D	183	<u>319</u>	239
BP2-1-120	60.7	<u>1.92×10⁴</u>	N.D	<u>219</u>	<u>719</u>	348
BP2-2-30	29.2	<u>3820</u>	N.D	90.6	145	95.8
BP2-2-60	38.8	<u>8520</u>	N.D	<u>234</u>	<u>529</u>	212
BP2-2-100	35.7	<u>9290</u>	N.D	166	<u>337</u>	<u>181</u>
BP2-2-120	23.8	1430	N.D	62.1	74.9	<u>55.1</u>
BP3-1-30	72.1	<u>6.42×10⁴</u>	2.29	1250	<u>2150</u>	<u>1010</u>
BP3-1-60	33.0	<u>2.67×10⁴</u>	0.89	360	<u>674</u>	<u>355</u>
BP3-1-100	25.2	<u>6060</u>	N.D	130	182	117
BP3-1-120	21.3	<u>2980</u>	N.D	79.8	104	67.1
BP3-2-30	56.0	<u>1.87×10⁴</u>	<0.67	<u>368</u>	<u>1030</u>	<u>439</u>
BP3-2-60	77.3	<u>2.52×10⁴</u>	0.77	<u>493</u>	<u>2060</u>	<u>560</u>
BP3-2-100	63.4	<u>2.26×10⁴</u>	<0.67	<u>455</u>	<u>1350</u>	482
BP3-2-120	45.4	<u>1.01×10⁴</u>	N.D	<u>208</u>	<u>455</u>	218
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	4.10	0.62	0.26	1.22	1.30	0.88

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-5 (續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
PR1-1-30	155	<u>5.73×10⁴</u>	<0.67	<u>884</u>	<u>931</u>	<u>997</u>
PR1-1-60	65.3	<u>4.84×10⁴</u>	<0.67	<u>975</u>	<u>3150</u>	<u>1240</u>
PR1-2-30	87.2	<u>4.58×10⁴</u>	<0.67	<u>592</u>	<u>1250</u>	<u>898</u>
PR1-2-60	62.5	<u>2.55×10⁴</u>	<0.67	<u>339</u>	<u>650</u>	<u>551</u>
PR2-1-30	60.9	<u>2.5×10⁴</u>	2.27	<u>467</u>	<u>2340</u>	<u>653</u>
PR2-1-60	71.8	<u>5.31×10⁴</u>	0.77	<u>1240</u>	<u>2230</u>	<u>1560</u>
PR2-1-100	44.2	<u>2.11×10⁴</u>	<0.67	<u>319</u>	<u>498</u>	<u>457</u>
PR2-1-120	25.3	<u>5150</u>	N.D	125	191	144
PR2-2-30	89.9	<u>2.62×10⁴</u>	<0.67	<u>393</u>	<u>1800</u>	<u>638</u>
PR2-2-60	58.6	<u>1.06×10⁴</u>	<0.67	187	<u>429</u>	286
PR2-2-100	32.0	<u>2590</u>	N.D	75.0	104	99.4
PR2-2-120	26.7	1030	N.D	60.2	56.0	50.6
CK-1-30	22.5	222	N.D	43.0	31.4	35.7
CK-1-60	22.6	148	N.D	42.6	28.0	34.5
CK-1-100	19.9	112	N.D	41.5	25.6	26.1
CK-1-120	17.2	124	N.D	39.8	25.6	25.7
CK-2-30	21.2	125	N.D	40.1	27.8	13.0
CK-2-60	22.4	125	N.D	40.0	25.4	27.8
CK-2-100	21.0	119	N.D	39.9	25.9	26.7
CK-2-120	21.3	104	N.D	40.3	25.6	27.4
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	4.10	0.62	0.26	1.22	1.30	0.88

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-6 102 年 12 月各試驗區土壤重金屬分析結果

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
BP1-1-30	108	<u>1.89×10⁴</u>	<0.67	<u>283</u>	<u>613</u>	<u>472</u>
BP1-1-60	104	<u>2.15×10⁴</u>	<0.67	<u>320</u>	<u>695</u>	<u>508</u>
BP1-1-100	108	<u>5.44×10⁴</u>	0.80	<u>457</u>	<u>609</u>	<u>828</u>
BP1-1-120	147	<u>6.06×10⁴</u>	0.79	<u>420</u>	<u>528</u>	<u>859</u>
BP1-2-30	78.3	<u>1.54×10⁴</u>	<0.67.	<u>325</u>	<u>929</u>	<u>409</u>
BP1-2-60	85.0	<u>1.80×10⁴</u>	<0.67	<u>430</u>	<u>1080</u>	<u>511</u>
BP1-2-100	84.8	<u>2.02×10⁴</u>	N.D.	<u>351</u>	<u>999</u>	<u>510</u>
BP1-1-120	137	<u>1.96×10⁴</u>	N.D.	<u>296</u>	<u>773</u>	<u>507</u>
BP2-1-30	60.0	<u>8670</u>	N.D.	146	<u>290</u>	232
BP2-1-60	70.7	<u>1.28×10⁴</u>	N.D.	180	<u>377</u>	<u>430</u>
BP2-1-100	88.9	<u>2.18×10⁴</u>	N.D.	<u>244</u>	<u>553</u>	<u>467</u>
BP2-1-120	67.0	<u>1.81×10⁴</u>	N.D.	192	<u>399</u>	301
BP2-2-30	40.4	<u>5260</u>	N.D.	146	<u>291</u>	157
BP2-2-60	56.5	<u>8970</u>	N.D.	<u>226</u>	<u>468</u>	228
BP2-2-100	40.8	<u>3880</u>	N.D.	106	205	111
BP2-2-120	31.7	<u>2470</u>	N.D.	75.2	120	80.3
BP3-1-30	58.3	<u>5.78×10⁴</u>	1.08	<u>477</u>	<u>1080</u>	<u>619</u>
BP3-1-60	39.3	<u>2.91×10⁴</u>	0.94	<u>314</u>	<u>660</u>	311
BP3-1-100	31.6	<u>9490</u>	N.D.	116	<u>225</u>	125
BP3-1-120	27.9	<u>8170</u>	N.D.	93.8	174	110
BP3-2-30	92.3	<u>5.96×10⁴</u>	2.51	<u>536</u>	<u>2890</u>	<u>892</u>
BP3-2-60	77.8	<u>4.45×10⁴</u>	0.95	<u>370</u>	<u>1640</u>	<u>580</u>
BP3-2-100	80.1	<u>4.26×10⁴</u>	<0.67	<u>385</u>	<u>1310</u>	<u>842</u>
BP3-2-120	102	<u>4.76×10⁴</u>	0.82	<u>403</u>	<u>1300</u>	<u>710</u>
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	4.74	0.63	0.33	1.66	1.85	0.99

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-6 (續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
PR1-1-30	103	<u>2.26×10⁵</u>	N.D.	<u>1050</u>	<u>1560</u>	<u>1160</u>
PR1-1-60	101	<u>2.35×10⁵</u>	<0.67	<u>866</u>	<u>2320</u>	<u>1800</u>
PR1-2-30	157	<u>2.03×10⁵</u>	N.D.	<u>467</u>	<u>1360</u>	<u>742</u>
PR1-2-60	71.6	<u>3.12×10⁴</u>	N.D.	146	<u>304</u>	280
PR2-1-30	99.6	<u>2.31×10⁴</u>	0.69	<u>434</u>	<u>2260</u>	<u>821</u>
PR2-1-60	114	<u>3.38×10⁴</u>	0.96	<u>437</u>	<u>1410</u>	<u>778</u>
PR2-1-100	99.5	<u>4.45×10⁴</u>	1.72	<u>835</u>	<u>3730</u>	<u>1270</u>
PR2-1-120	99.2	<u>1.15×10⁵</u>	0.92	<u>686</u>	<u>2020</u>	<u>969</u>
PR2-2-30	47.0	<u>5210</u>	N.D.	66.7	111	78.9
PR2-2-60	55.5	<u>8450</u>	N.D.	73.2	132	107
PR2-2-100	59.5	<u>8640</u>	N.D.	76.8	120	110
PR2-2-120	63.3	<u>9630</u>	N.D.	74.8	111	109
CK-1-30	31.7	267	N.D.	42.2	43.4	49.9
CK-1-60	31.3	251	N.D.	38.4	30.3	41.3
CK-1-100	29.8	270	N.D.	35.7	26.1	41.9
CK-1-120	25.5	200	N.D.	34.7	28.4	32.0
CK-2-30	27.9	146	N.D.	35.2	25.2	29.2
CK-2-60	28.0	88.2	N.D.	37.9	24.8	30.0
CK-2-100	27.8	79.4	N.D.	37.0	25.4	29.0
CK-2-120	21.8	80.5	N.D.	35.7	24.0	25.8
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	4.74	0.63	0.33	1.66	1.85	0.99

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-7 103 年 7 月各試驗區土壤重金屬分析結果

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
BP1-1-30	117	<u>2.43×10⁴</u>	<0.67	<u>259</u>	<u>494</u>	<u>403</u>
BP1-1-60	152	<u>1.09×10⁵</u>	N.D.	<u>766</u>	<u>1810</u>	<u>1500</u>
BP1-1-100	128	<u>8.02×10⁴</u>	0.80	<u>721</u>	<u>822</u>	<u>838</u>
BP1-1-120	109	<u>8.11×10⁴</u>	0.79	<u>591</u>	<u>622</u>	<u>775</u>
BP1-2-30	76.9	<u>1.60×10⁴</u>	N.D.	<u>271</u>	<u>748</u>	65.6
BP1-2-60	77.2	<u>2.15×10⁴</u>	N.D.	<u>324</u>	<u>950</u>	<u>436</u>
BP1-2-100	107	<u>2.65×10⁴</u>	N.D.	<u>422</u>	<u>690</u>	<u>681</u>
BP1-1-120	130	<u>4.61×10⁴</u>	<0.67	<u>561</u>	<u>1080</u>	<u>869</u>
BP2-1-30	77.0	<u>1.34×10⁴</u>	N.D.	<u>208</u>	<u>424</u>	289
BP2-1-60	81.3	<u>1.14×10⁴</u>	N.D.	<u>254</u>	<u>590</u>	352
BP2-1-100	89.4	<u>1.72×10⁴</u>	N.D.	<u>299</u>	<u>587</u>	<u>481</u>
BP2-1-120	107	<u>1.94×10⁴</u>	N.D.	<u>249</u>	<u>363</u>	<u>531</u>
BP2-2-30	47.3	<u>4840</u>	N.D.	144	237	154
BP2-2-60	55.5	<u>8390</u>	N.D.	178	<u>361</u>	209
BP2-2-100	79.0	<u>4.28×10⁴</u>	N.D.	<u>518</u>	<u>1510</u>	<u>687</u>
BP2-2-120	256	<u>5.98×10⁴</u>	0.68	<u>748</u>	<u>1900</u>	<u>1530</u>
BP3-1-30	87.0	<u>3.82×10⁴</u>	0.67	<u>544</u>	<u>1400</u>	<u>676</u>
BP3-1-60	89.6	<u>3.43×10⁴</u>	0.68	<u>533</u>	<u>1580</u>	<u>687</u>
BP3-1-100	87.0	<u>4.52×10⁴</u>	0.79	<u>673</u>	<u>1570</u>	<u>927</u>
BP3-1-120	119	<u>3.38×10⁴</u>	3.97	<u>963</u>	<u>1930</u>	<u>891</u>
BP3-2-30	80.3	<u>6630</u>	1.57	<u>238</u>	<u>590</u>	260
BP3-2-60	81.0	<u>6420</u>	1.45	<u>255</u>	<u>537</u>	226
BP3-2-100	89.7	<u>9050</u>	1.87	<u>377</u>	<u>1510</u>	394
BP3-2-120	87.7	<u>8380</u>	1.58	<u>308</u>	<u>860</u>	304
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	4.74	0.63	0.33	1.66	1.85	0.99

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-7 (續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
PR1-1-30	131	<u>6.38×10⁴</u>	3.30	<u>966</u>	<u>1050</u>	<u>1190</u>
PR1-1-60	132	<u>5.88×10⁴</u>	3.71	<u>1030</u>	<u>2710</u>	<u>1280</u>
PR1-2-30	180	<u>5.28×10⁴</u>	3.30	<u>1470</u>	<u>2140</u>	<u>1080</u>
PR1-2-60	351	<u>7.79×10⁴</u>	3.30	<u>1060</u>	<u>1150</u>	<u>1180</u>
PR2-1-30	67.7	<u>4040</u>	1.06	84.0	114	90.4
PR2-1-60	61.0	<u>4060</u>	1.18	89.8	134	112
PR2-1-100	74.5	<u>8350</u>	1.45	144	207	138
PR2-1-120	80.1	<u>1.09×10⁴</u>	1.65	187	<u>301</u>	209
PR2-2-30	154	<u>5.68×10⁴</u>	3.92	<u>716</u>	<u>2320</u>	<u>1190</u>
PR2-2-60	46.9	1830	1.08	65.9	77.2	<u>1280</u>
PR2-2-100	57.7	<u>3840</u>	1.51	93.5	150	<u>1080</u>
PR2-2-120	47.8	1660	0.96	62.0	56.0	<u>1180</u>
CK-1-100	36.6	97.3	0.79	42.9	29.0	27.1
CK-1-120	36.9	94.2	<0.67	41.4	28.1	24.0
CK-2-100	34.3	92.8	<0.67	39.8	24.4	23.8
CK-2-120	30.2	97.5	<0.67	40.2	23.5	23.7
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	4.74	0.63	0.33	1.66	1.85	0.99

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

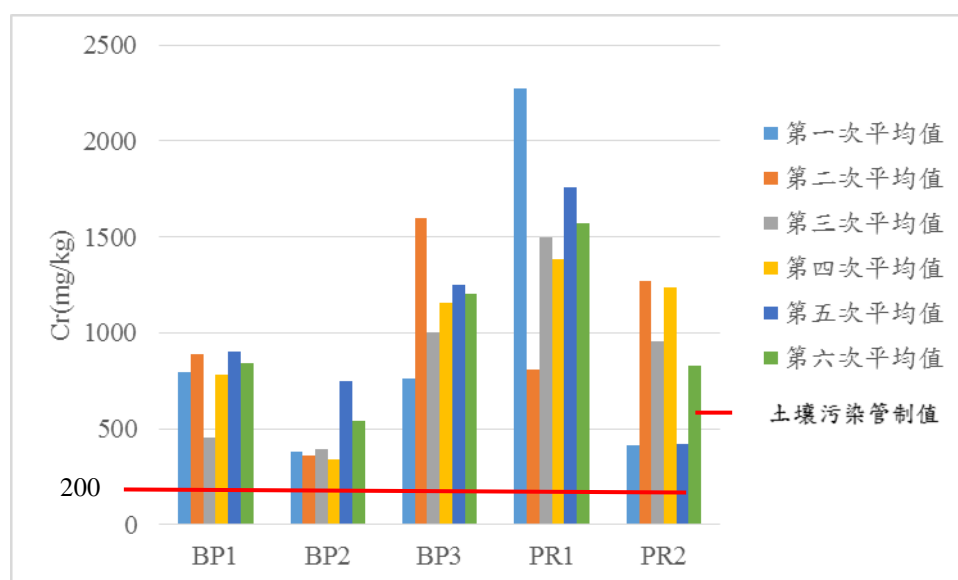
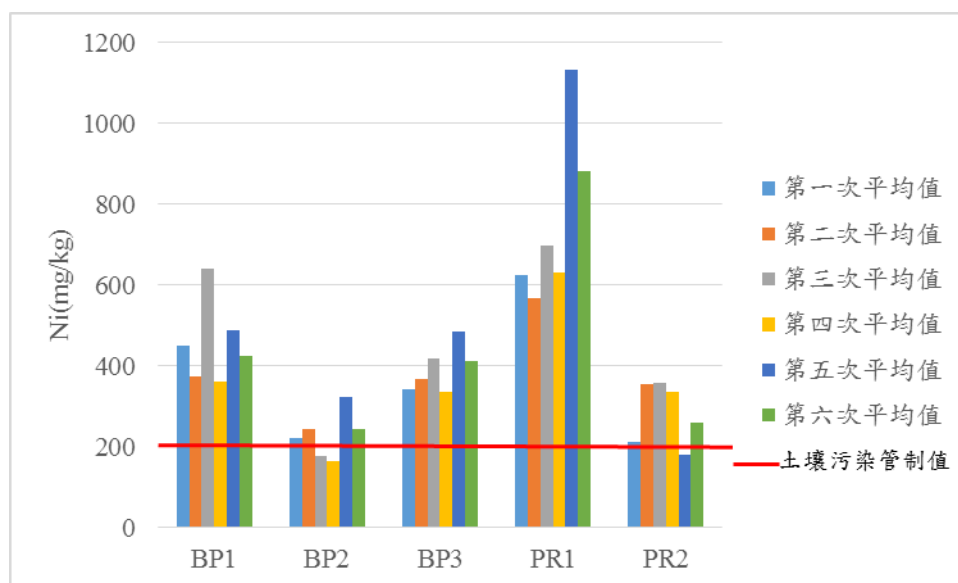
表 4-8 104 年 7 月各試驗區土壤重金屬分析結果

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	Mg/kg					
BP1-30	87.6	<u>2.03×10⁴</u>	N.D	<u>307</u>	<u>698</u>	<u>482</u>
BP1-60	94.6	<u>2.68×10⁴</u>	N.D	<u>378</u>	<u>796</u>	<u>531</u>
BP1-100	67.0	<u>1.93×10⁴</u>	N.D	<u>283</u>	<u>631</u>	<u>503</u>
BP1-120	57.8	<u>1.89×10⁴</u>	N.D	<u>274</u>	<u>531</u>	<u>558</u>
BP2-30	93.3	<u>1.05×10⁴</u>	N.D	137	<u>264</u>	316
BP2-60	98.8	<u>1.09×10⁴</u>	N.D	170	<u>362</u>	<u>1099</u>
BP2-100	80.3	<u>6609</u>	N.D	102	215	226
BP2-120	68.4	<u>5145</u>	N.D	104	204	155
BP3-30	68.2	<u>1.07×10⁴</u>	N.D	<u>378</u>	<u>898</u>	<u>518</u>
BP3-60	45.1	<u>1.29×10⁴</u>	N.D	<u>375</u>	<u>835</u>	386
BP3-100	26.8	1935	N.D	163	<u>502</u>	157
BP3-120	14.8	951	N.D	39.4	65.6	41.0
PR1-30	99.8	<u>4.15×10⁴</u>	N.D	<u>657</u>	<u>895</u>	<u>943</u>
PR1-60	109	<u>4.44×10⁴</u>	N.D	<u>596</u>	<u>889</u>	<u>978</u>
PR1-100	109	<u>4.57×10⁴</u>	N.D	<u>900</u>	<u>1084</u>	<u>1335</u>
PR1-120	92.2	<u>5.43×10⁴</u>	N.D	<u>998</u>	<u>1281</u>	<u>1251</u>
PR2-30	71.4	<u>3.38×10⁴</u>	N.D	<u>390</u>	<u>1195</u>	<u>686</u>
PR2-60	54.0	<u>3.20×10⁴</u>	N.D	<u>295</u>	<u>942</u>	<u>593</u>
PR2-100	39.5	<u>7530</u>	N.D	113	163	132
PR2-120	30.7	<u>4648</u>	N.D	75.0	99.2	85.2
CK -30	21.8	1072	N.D	39.8	63.6	55.0
CK -60	19.2	610	N.D	31.9	41.1	38.7
CK -100	21.2	1691	N.D	45.8	55.8	51.8
CK -120	17.0	1261	N.D	37.4	42.0	40.6
土壤污染管制標準	2000	2000	20	200	250	400
偵測極限(MDL)	7.67	1.78	2.89	14.1	16.6	4.00

註:測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

表 4-9 各復育區六次土壤重金屬濃度平均值

重金屬 實驗區	Ni (mg/kg)						Cr (mg/kg)					
	採樣次數						採樣次數					
	一	二	三	四	五	六	一	二	三	四	五	六
BP1	451	374	640	360	489	425	793	890	453	778	902	840
BP2	222	245	176	164	324	245	381	362	393	337	746	542
BP3	341	366	418	336	486	412	760	1596	1001	1159	1247	1204
PR1	623	566	698	632	1131	882	2271	807	1495	1386	1762	1574
PR2	211	356	358	335	180	258	413	1268	956	1236	419	828
管制 標準	200						200					
重金屬 實驗區	Cu (mg/kg)						Zn (mg/kg)					
	採樣次數						採樣次數					
	一	二	三	四	五	六	一	二	三	四	五	六
BP1	880	592	394	575	695	636	35717	26350	21591	28575	50800	39550
BP2	321	377	231	250	529	390	58700	13799	10452	10244	22153	16161
BP3	372	482	406	523	545	535	45008	15468	22068	37358	22410	29975
PR1	744	925	922	995	1182	1089	47075	57267	38500	173800	63325	118000
PR2	434	786	486	530	201	595	29750	23330	18084	6696	11435	21175
管制 標準	400						2000					



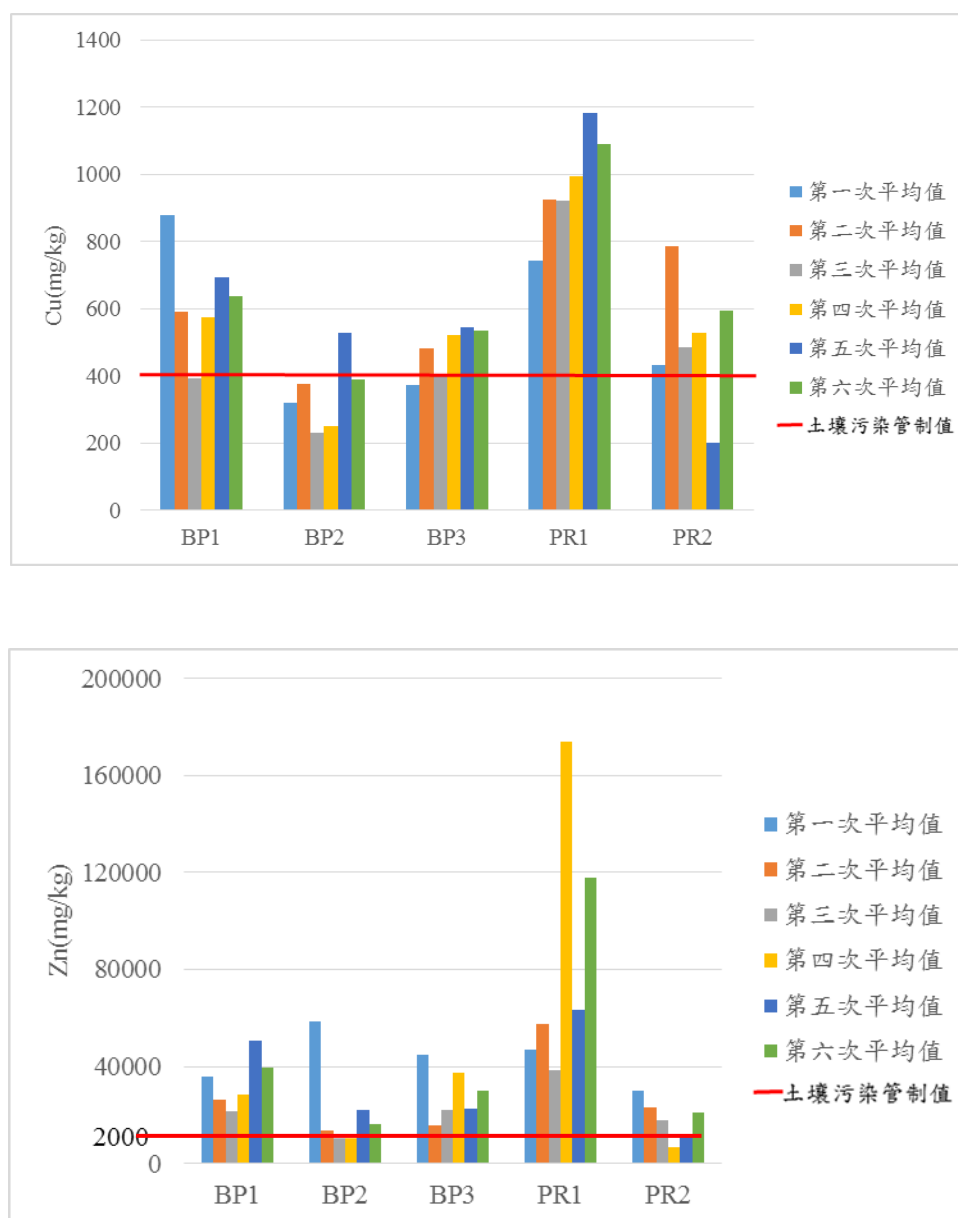


圖 4-10 各復育區六次土壤重金屬濃度平均值變化趨勢

三、土壤性質及重金屬型態分析結果

本年度為進一步探討土壤性質、重金屬型態與植物吸收量之關係與影響，故而採集各試驗區表土(0~30cm)進行基本物化性質分析，結果(表 4-10)指出，各試驗區土壤之 pH 值介於 6.5~6.8，皆為中性且差異不大；土壤質地之測值發現，五個復育區皆屬於砂土，砂粒含量皆在 70% 以上，僅對照屬於砂質壤土；有機碳(OC)及陽離子交換容量(CEC)之測值均偏低，其中 OC 含量介於 0.34%~3.88%，以對照區最低，BP 最高；CEC 為 11.0~17.5 cmol/kg，對照區雖然有機質含量最低，但測值仍有 13.2 cmol/kg，可能與其粉粒及黏粒含量較高有關。

除基本物化性質外，為了解土壤重金屬之有效性，亦對所採土樣進行 0.01M

CaCl₂ 可萃取重金屬分析，由表 4-11 可知，在本場址主要污染重金屬 Zn、Cr、Cu、Ni 中，僅 Zn 與 Ni 在各試驗區有測值，且 Zn 高於 Ni 甚多，其餘重金屬則未檢出。顯示 Zn 較易溶出而存在土壤溶液中，且被復育植物吸收。

表 4-10 土壤物化性質

sample	pH	OC	CEC	Sand	Silt	Clay	質地
		%	cmol/kg	%			
CK	6.50	0.34	13.2	45	37	18	砂質壤土
PR1	6.85	1.76	12.1	75	12	13	砂土
PR2	6.70	2.26	11.0	74	13	13	砂土
BP1	6.74	2.38	17.5	71	13	16	砂土
BP2	6.81	0.97	16.0	73	11	16	砂土
BP3	6.76	3.88	13.3	74	11	15	砂土

表 4-11 0.01M CaCl₂ 可萃取重金屬分析結果

sample	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg/kg					
CK	ND	ND	ND	0.51	ND	10.6
PR1	ND	ND	0.31	5.58	ND	28.8
PR2	ND	ND	ND	0.92	ND	18.3
BP1	ND	ND	ND	2.24	ND	28.6
BP2	ND	ND	ND	0.50	ND	12.8
BP3	ND	ND	ND	7.39	ND	28.8
MDL	0.25	1.52	0.92	1.26	4.09	0.65

4.5 植物生理調查與採樣分析

如上所述，本年度植生復育之木本植物，除延續第一年所栽種之白楊外，另外於計畫第三年栽植構樹與血桐；而草本植物則種植太陽麻。而生理調查包括生育調查與生理試驗，在計畫期間共計進行兩次木本及草本植物之生育調查，兩次木本植物之生理試驗；而植體採樣分析則為木本植物與草本植物各一次。茲將各類植物之生理調查(生育調查與生理試驗)與採樣分析結果分述如下。

一、生育調查成果

(一)白楊生育調查成果

本計畫前兩年共八次對各試驗區白楊樹進行生育調查，其方法為量測地上部之高度，各試驗區量測之平均值列於表 4-12，而生長狀況則如圖 4-3 所示。前四次係於栽植一個月後定期調查。而如前所述，自 101 年 11 月中旬起葉片開始轉黃並逐漸掉葉，至 1 月初全部落葉，一直到 102 年 4 月中旬才陸續長出新葉，其後即快速生長，且分蘗數亦多，至 8 月中旬為止，四個月之成長率高達 245~410%，顯見白楊確可適應污染物並快速生長，對污染改善將有相當正面之效益。由於最後一次調查時之平均樹高已達 252~318 公分(表 4-12)，在 102 年至 103 年幾次颱風期間皆造成倒伏損傷狀況(風災倒伏植株分別如圖 4-11 及圖 4-12)，為防範颱風災損，且兼顧復育效益評析對生質量之需求，故 103 年度以後之生育調查皆由株高改為各區修剪枝葉後之重量統計（即生質量），修剪作業分別如圖 4-11 及圖 4-12。

本年度開始執行時(103 年 12 月 1 日)白楊已進入落葉期，直到 104 年 4 月下旬才逐漸長出新葉，並迅速成長，故本年度於 8 月進行枝葉修剪及生質量計算，而 104 年 8 月颱風造成植栽倒伏情況如圖 4-13。

表 4-12 白楊生育調查平均值彙整表

試驗區		CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
第一次	cm	67	70	75	62	73	70
第二次		124	114	127	76	96	76
第三次		150	168	187	91	138	103
第四次		165	189	194	96	158	113
第一年成長率	%	146	170	213	55	116	61
第五次	cm	123	190	174	95	159	109
第六次		156	202	247	199	189	202
第七次		202	249	195	194	202	202
第八次		281	263	318	316	252	296
第二年成長率	%	319	278	324	410	245	323

註：第一年成長率＝[(第四次測值－第一次測值)÷第一次測值]×100

第二年成長率＝[(第八次測值－第一次測值)÷第一次測值]×100



圖 4-11 102 年風災倒伏植株與枝葉修剪作業



圖 4-12 103 年風災倒伏植株與枝葉修剪作業



圖 4-13 104 年風災倒伏植株與枝葉修剪作業

(二) 構樹與血桐生育調查成果

血桐與構樹係於 103 年 1 月 15 日栽種，樹苗來自屏科大森林系苗圃。當日即進行株高量測，其後分別於 2 月 9 日、3 月 31 日、5 月 12 日、7 月 16 日、8 月 21 日與 9 月 26 日再進行六次生育調查，亦即 103 年共計執行七次；本年度之生育調查係於 104 年 4 月 22 日進行，兩年之調查結果如表 4-13 與表 4-14 所示，外觀則如圖 4-2。由圖表資料可知，經兩年餘之栽植後，其成長率分別為血桐之 130~360% 與構樹之 678~1941%，且由外觀可知其生長狀況皆屬正常。而就其成長率而言，構樹之對照區顯著高於復育區，血桐則在 BP1 與 BP3 及 PR1 有此現象，表示此階段污染物對兩種植物之生長有不同程度之影響，構樹尤甚。惟此現象是否導因於植株生長期短而尚未成熟之故，長成後是否逐漸適應而逐漸趨於一致，有待後續之試驗與觀察。

表 4-13 血桐生育調查結果

試驗區		CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
第一次	cm	86	98	78	85	79	71
第二次		100	86	83	96	89	85
第三次		116	96	89	98	105	86
第四次		137	107	113	128	129	111
第五次		189	154	222	178	195	171
第六次		235	168	268	200	228	210
第七次		282	207	333	230	281	259
第八次		327	226	359	255	291	281
成長率	%	280 ^{b*}	130 ^d	360 ^a	200 ^c	268 ^b	295 ^b

註：1.*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

2.成長率=[(第八次測值－第一次測值)÷第一次測值]×100

表 4-14 構樹生育調查結果

試驗區		CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
第一次	cm	12	14	17	11	19	12
第二次		32	16	13	13	23	13
第三次		54	22	19	13	40	24
第四次		55	41	52	41	47	46
第五次		157	93	169	126	94	136
第六次		178	101	205	139	107	151
第七次		233	119	227	154	133	185
第八次		245	155	322	193	148	201
成長率	%	1941 ^{a*}	1007 ^d	1794 ^{bc}	1654 ^b	678 ^d	1575 ^b

註：1.*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

2.成長率=[(第八次測值－第一次測值)÷第一次測值]×100

(三)太陽麻生育調查成果

如上所述，本年度已完成兩次太陽麻栽種與採收。收成後之植株照片分別如圖 4-4 所示，而其生育調查數據則列於表 4-15。表中數據指出，無論是株高或乾重都以 CK 區之值最大，顯示污染物對太陽麻之生長皆有程度不一的影響。而本年度第二次之株高與乾重平均值皆大於第一次，此差異可能是第一次之栽種期為 2~4 月，適逢冬季之低溫、短日照及乾旱氣候，第二次之栽種期為 4~7 月，氣溫較高且日照較長所致。

表 4-15 太陽麻生育調查結果

編號	株高(cm)	乾重(g)	株高(cm)	乾重(g)
	第一次		第二次	
CK	75 ^{a#}	1.5	153 ^{a#}	3.5
BP1	59 ^{cd}	1.1	138 ^b	2.6
BP2	56 ^d	1.4	109 ^{cd}	1.5
BP3	62 ^{bc}	1.0	105 ^d	1.8
PR1	65 ^b	1.0	113 ^c	2.4
PR2	54 ^d	0.9	135 ^b	2.6
mean±SE	62±7	1.2±0.2	126±19	2.4±0.7

1.表中各值為 10 顆植株之平均值

2.#不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

二、生理試驗

本年度共計對木本植物進行 2 次生理試驗，分別於 104 年 5 月 8 日及 10 月 3 日進行，茲將淨光合作用率與葉綠素螢光 F_v/F_m 值之測定結果分述如下；

(一)復育樹種淨光合作用率測定結果

表 4-16～表 4-18 分別為血桐、構樹及白楊之淨光合作用率測定結果，此測值代表植物的光合潛力。表 4-16 指出，血桐第一次測值以 PR1 的光合潛力最高，且除 BP3 外，其餘各區之測值皆與對照區無顯著差異。第二次則以 PR2 及 PR1 兩區的光合潛力最高，且亦僅 BP3 區之測值與對照區有顯著差異，顯示多數血桐已逐漸適應此污染環境。而由構樹之光合潛力(表 4-17)發現，第一、二次測值皆以 CK 區顯著較高，各試驗區第一次測值皆呈現偏低現象，尤其以 BP3 為最，而第二次測值則都呈現大幅提升，顯示構樹逐漸適應本場之污染環境。

白楊淨光合潛力測定結果(表 4-18)指出，第一次測值以 CK、PR2 及 BP2 等 3 區顯著最高，BP1 則有顯著較低之現象。而第二次測值顯示以 CK、BP1、PR2 區為顯著最高，BP2、BP3、PR1 則出現顯著較低現象。由於白楊栽種已三年，植株已趨成熟，故去年(103 年)之生理試驗顯示各區之淨光合潛力並無顯著差異，本年測值出現較大差異可能導因於第一次測值正逢新葉初長且全株未長齊，而第二次測值則逢入秋，白楊已接近 11 月之落葉期，生理狀態逐漸遲緩之故。

表 4-16 血桐淨光合作用率測定結果

編號	淨光合作用率($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
	第一次測值					
1	18.4	18.9	18.4	13.5	20.8	17.3
2	18.7	15.9	14.8	17.0	17.5	17.8
3	17.6	18.2	14.1	14.8	17.0	17.0
mean \pm SE	18.2 \pm 0.3 ^{ab}	17.7 \pm 0.9 ^{ab}	15.8 \pm 1.3 ^{ab}	15.1 \pm 1.0 ^b	18.4 \pm 1.2 ^a	17.3 \pm 0.2 ^{ab}
編號	第二次測值					
1	19.6 \pm 0.5	19.5 \pm 0.5	20.4 \pm 1.5	16.3 \pm 0.6	19.8 \pm 0.1	20.9 \pm 2.1
2	23.0 \pm 2.7	17.8 \pm 1.1	17.5 \pm 0.1	18.5 \pm 0.4	21.0 \pm 1.1	23.8 \pm 0.2
3	22.7 \pm 0.7	19.2 \pm 1.2	21.7 \pm 0.2	18.5 \pm 0.6	23.5 \pm 0.3	19.9 \pm 1.9
4	18.5 \pm 0.2	17.9 \pm 0.0	22.5 \pm 0.6	20.5 \pm 1.6	20.9 \pm 0.1	20.9 \pm 0.7
mean \pm SE	20.9 \pm 0.9 ^a	18.6 \pm 0.4 ^a	20.5 \pm 0.8 ^{ab}	18.4 \pm 0.7 ^b	21.3 \pm 0.6 ^a	21.4 \pm 0.8 ^a

* 不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

表 4-17 構樹淨光合作用率測定結果

編號	淨光合作用率($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
	第一次測值					
1	11.1	8.9	8.7	10.0	9.6	9.9
2	9.6	9.2	13.8	3.7	13.4	8.1
3	9.8	9.6	7.2	9.8	10.7	10.1
4	11.8	10.2	8.7	3.2	12.3	12.1
mean \pm SE	10.6 \pm 0.5 ^a	9.5 \pm 0.3 ^{ab}	9.6 \pm 1.4 ^{ab}	6.7 \pm 1.9 ^b	11.5 \pm 0.8 ^a	10.1 \pm 0.8 ^{ab}
編號	第二次測值					
1	24.1 \pm 1.3	19.0 \pm 0.8	22.3 \pm 1.9	16.8 \pm 0.4	24.2 \pm 2.1	18.2 \pm 0.0
2	25.2 \pm 0.8	18.7 \pm 1.5	21.7 \pm 0.4	18.0 \pm 0.8	23.8 \pm 1.2	17.3 \pm 0.6
3	21.4 \pm 0.8	19.2 \pm 0.2	17.9 \pm 1.4	21.6 \pm 0.4	21.2 \pm 1.0	17.9 \pm 0.8
4	24.7 \pm 0.5	19.9 \pm 2.6	19.0 \pm 1.1	17.4 \pm 0.7	19.1 \pm 0.7	19.6 \pm 0.2
mean \pm SE	23.8 \pm 0.6 ^a	19.2 \pm 0.6 ^c	20.2 \pm 0.9 ^{bc}	18.4 \pm 0.7 ^c	22.1 \pm 0.9 ^{ab}	18.2 \pm 0.4 ^c

* 不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

表 4-18 白楊淨光合作用率測定結果

編號	淨光合作用率($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
	第一次測值					
1	15.4	15.1	15.8	14.0	16.2	19.2
2	19.2	11.6	15.2	11.8	19.5	17.0
3	16.3	11.1	18.1	16.9	10.7	20.5
4	20.1	10.4	19.7	13.7	12.6	13.6
mean \pm SE	17.8 \pm 1.1 ^a	12.1 \pm 1.0 ^b	17.2 \pm 1.0 ^a	14.1 \pm 1.1 ^{ab}	14.8 \pm 2.0 ^{ab}	17.6 \pm 1.5 ^a
編號	第二次測值					
1	13.6 \pm 0.3	12.4 \pm 0.3	12.0 \pm 0.2	10.4 \pm 0.3	12.5 \pm 0.2	12.4 \pm 1.3
2	13.2 \pm 0.0	13.4 \pm 0.3	9.3 \pm 0.1	9.7 \pm 0.1	9.7 \pm 0.5	11.3 \pm 0.1
3	11.6 \pm 0.2	13.3 \pm 0.9	9.1 \pm 0.3	9.9 \pm 0.0	11.0 \pm 1.7	12.5 \pm 0.0
4	11.9 \pm 0.0	9.9 \pm 0.4	9.9 \pm 1.4	11.3 \pm 0.1	8.9 \pm 0.8	12.7 \pm 0.0
mean \pm SE	12.6 \pm 0.3 ^a	12.2 \pm 0.6 ^a	10.0 \pm 0.5 ^b	10.3 \pm 0.2 ^b	10.5 \pm 0.6 ^b	12.2 \pm 0.3 ^a

*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

(二)復育樹種葉綠素螢光 F_v/F_m 值測定結果

表 4-19～表 4-21 分別為血桐、構樹及白楊之葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益(F_v/F_m)測定結果。由於 F_v/F_m 代表光合系統 II 之最大光化學潛能，故可做為植物是否遭受逆境之指標，供評估其健康狀態之用。一般而言，健康植株的測值高於 0.75，而若測值低於 0.725 則屬顯著受害之情況。由表 4-19 的數據可看出，血桐之葉綠素螢光 F_v/F_m 值除第一次之 PR2 平均測值低於 0.725 外，其餘平均測值皆高於 0.75，且五個復育區與對照區間皆無顯著差異，顯示血桐適應良好，均屬健康範圍。而構樹之情況類似，僅第一次之 PR1 與 PR2 兩區有遭受逆境之現象，其餘測值均在 0.77 以上，顯示構樹也逐漸適應土壤環境。至於白楊之測定結果(表 4-21)也發現，第一次 PR2 之測值有較低之現象，但在第二次測值中已不復見。由以上試驗結果可知，各類復育植物皆已逐漸適應污染環境。

表 4-19 血桐葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益

編號	葉綠素螢光 F_v/F_m 值					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
	第一次測值					
1	0.823	0.810	0.675	0.768	0.803	0.676
2	0.820	0.788	0.808	0.757	0.765	0.708
3	0.808	0.796	0.800	0.818	0.737	0.651
mean±SE	0.82±0.00 ^a	0.80±0.01 ^a	0.77±0.04 ^a	0.78±0.02 ^a	0.77±0.03 ^a	0.68±0.02 ^b
編號	第二次測值					
1	0.806	0.783	0.807	0.751	0.808	0.794
2	0.808	0.780	0.768	0.786	0.809	0.804
3	0.822	0.801	0.777	0.765	0.785	0.741
4	0.817	0.816	0.809	0.815	0.786	0.766
mean±SE	0.813±0.003 ^a	0.795±0.007 ^{ab}	0.790±0.011 ^{ab}	0.779±0.012 ^b	0.797±0.005 ^{ab}	0.776±0.010 ^b

*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

表 4-20 構樹葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益

編號	葉綠素螢光 F_v/F_m 值					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
	第一次測值					
1	0.789	0.778	0.772	0.750	0.686	0.608
2	0.807	0.779	0.806	0.803	0.587	0.718
3	0.775	0.741	0.766	0.770	0.712	0.644
4	0.758	0.715	0.797	0.797	0.670	0.703
mean±SE	0.78±0.01 ^a	0.75±0.02 ^a	0.79±0.01 ^a	0.78±0.01 ^a	0.66±0.03 ^b	0.67±0.03 ^b
編號	第二次測值					
1	0.810	0.811	0.789	0.772	0.768	0.766
2	0.813	0.768	0.759	0.800	0.776	0.785
3	0.827	0.805	0.767	0.800	0.791	0.802
4	0.809	0.794	0.790	0.778	0.798	0.799
mean±SE	0.815±0.004 ^a	0.794±0.007 ^{ab}	0.776±0.011 ^b	0.787±0.007 ^b	0.783±0.007 ^b	0.788±0.006 ^b

*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

表 4-21 白楊葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益

編號	葉綠素螢光 F_v/F_m 值					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
	第一次測值					
1	0.798	0.726	0.798	0.807	0.697	0.709
2	0.796	0.788	0.744	0.790	0.737	0.696
3	0.828	0.766	0.811	0.789	0.769	0.702
4	0.778	0.749	0.787	0.822	0.763	0.723
mean±SE	0.80±0.01 ^a	0.76±0.01 ^{ab}	0.79±0.01 ^{ab}	0.80±0.01 ^a	0.74±0.02 ^{bc}	0.71±0.01 ^c
編號	第二次測值					
1	0.830	0.789	0.777	0.779	0.786	0.803
2	0.813	0.794	0.772	0.779	0.790	0.760
3	0.806	0.803	0.794	0.775	0.779	0.772
4	0.812	0.805	0.794	0.756	0.766	0.797
mean±SE	0.815±0.004 ^a	0.798±0.006 ^{ab}	0.784±0.007 ^{bc}	0.772±0.008 ^c	0.780±0.008 ^{bc}	0.783±0.007 ^{bc}

*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異($p < 0.05$)

三、植體重金屬分析成果

一如前述，本年度已於8月進行三種木本植物之植體採集及分析，而草本植物亦分別採集太陽麻及牛筋草植體並完成分析，結果分別列於表4-22～表4-24。

由表4-22及表4-23之數據可知，各試驗區草本植物對土壤中污染量與0.01M CaCl_2 可萃取量最高的Zn皆有最高之吸收累積量，其餘三個主要污染元素Cu、Cr、Ni之含量則遠低於Zn。此外，根之含量大於地上部，此乃因根部為吸收器官，其吸收與儲存之重金屬須經運輸機制方能到達地上部，復因地上部生長所引起的稀釋效果，故而根部有較高之含量，此為植物生理常見之現象（Mengel and Kirkby, 1986）。而各重金屬在植體中之吸收累積量以鋅最大，其餘三個元素略呈 $\text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr}$ 之現象，此結果與Kabafa-pendias(2010)研究所得，微量元素被植物攝取之容易度依序為 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Cr}$ 一致。亦與Dean(2006)所指，土壤金屬被植物攝取之轉換因子（Transfer factor）由大而小為 $\text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb}$ 相符。至於各區植體中之含量比較顯示，CK區之植體含量最低，此與其土壤中之最低含量一致。此外，比較表4-22與表4-23可知，牛筋草之吸收累積量大於太陽麻。

木本植物之分析結果列於表 4-24。由表中數值可知，與草本植物類似，在四種主要污染重金屬中，各類木本植物對 Zn 皆有最高之吸收累積量，其餘三個元

素之含量亦遠低於 Zn。其次，就各區植體中之含量比較發現，CK 區之植體含量多低於各復育區，此與 CK 區土壤中之最低含量一致。此外，就三種木本植物之吸收累積量比較發現，以白楊之含量最高，意味有較大之吸收累積能力，構樹次之，血桐最低。由於白楊之成長期較長，故根系發育較深廣。但構樹與血桐之兩次測值則呈現第二次之分析值明顯高於第一次之現象，其原因可能是隨生長期增長，植物逐漸適應污染環境而增加吸收累積量。由於血桐與構樹栽植時程仍短，故其吸收累積量低於白楊，未來是否會漸趨一致，有待持續試驗與觀察。

就白楊植體之濃度範圍 1235~2107 mg/kg 觀之，Kacálková et al. (2015)以水柳及白楊整治 Cd、Zn、及 Cu 污染土壤，其結果指出，白楊植體的鋅濃度為 463 g/kg；Luca et al. (2004)以白楊整治工業區重金屬污染土壤的結果也指出，植體的鋅濃度約為 290 kg；Luo et al. (2005)以玉米及菜豆進行 Cu、Pb、Zn、Cd 之吸收試驗，結果發現玉米的鋅累積濃度為 580 ± 10.2 mg/kg，菜豆則為 431 ± 41 mg/kg。顯然本計畫的白楊鋅濃度較其他研究結果高，其可能原因為本場址之土壤鋅濃度高於各研究之污染濃度。而此結果也顯示，白楊較玉米及菜豆等其他作物具有較佳之鋅吸收累積能力。

表 4-22 太陽麻植體之重金屬含量

重金屬 試驗區	Cr	Cu	Ni	Zn
	mg/kg			
根				
BP1	12.8	24.6	11.5	595
BP2	6.61	13.6	5.48	244
BP3	11.1	21.7	9.51	503
PR1	13.9	20.8	4.95	542
PR2	26.4	61.4	10.7	713
CK	9.09	7.16	N.D	8.71
地上部				
BP1	4.61	6.98	4.61	519
BP2	5.88	9.24	3.02	273
BP3	5.43	9.25	3.11	445
PR1	5.18	9.29	1.99	225
PR2	4.94	15.6	5.48	349
CK	3.77	9.42	N.D	72.2

表 4-23 牛筋草植體之重金屬含量

重金屬 試驗區	Cr	Cu	Ni	Zn
	mg/kg			
根				
BP	304	128	171	3143
PR	122	332	178	5478
CK	40.8	36.0	19.7	685
地上部				
BP	15.3	12.5	10.1	881
PR	10.9	18.2	15.3	1516
CK	25.4	11.2	5.14	513

表 4-24 各復育區木本植物重金屬含量平均值

重金屬 試驗區	Cr	Ni	Cu	Zn
	mg/kg			
白楊				
BP1	6.55	10.5	12.2	2041
BP2	9.19	7.54	13.1	1273
BP3	8.53	11.7	7.74	2107
PR1	10.2	4.80	15.4	1772
PR2	6.16	5.25	9.41	1235
構樹				
BP1	6.71	3.70	8.35	196.
BP2	5.17	4.49	11.3	608
BP3	6.25	5.00	5.82	168
PR1	7.30	1.21	5.60	67.8
PR2	9.54	2.84	7.17	96.1
血桐				
BP1	5.46	2.04	6.43	64.5
BP2	8.60	3.17	10.1	134
BP3	8.46	7.30	8.01	142
PR1	8.73	2.82	8.77	124
PR2	13.0	2.86	6.90	92.3

4.6 土壤與植體重金屬含量之關係

本年度為了較精確了解土壤與植體重金屬含量之關係，亦即土壤重金屬含量對復育樹種之重金屬吸收累積量的影響，乃分別於五個復育區選取白楊、構樹與血桐各兩顆，以樹幹為原點，50 公分為半徑，於東、南、西、北四方位各設一採集點，分別採集各層土壤混合樣品。於此同時，並於四個方位採集對應之植體樣品，進行重金屬含量分析，進而探討其相關性。所有土壤與植體之重金屬測值列於表 4-25。而相關性係分別就各試驗區白楊、構樹與血桐之主要污染重金屬 Zn 含量與對應的土層（30、60、100、120 及四土層平均值）土壤測值探討之，其相關係數列於表 4-26。

由表 4-26 可知，白楊植體 Zn 含量與各土層土壤之測值及平均值皆呈正相關，而關係較密切的為 60~120 公分土層，可能是經過三年的生長，其根系主要分布於該土層之故。血桐之相關係數在 30 公分土層大於 60 公分，可能生長期仍短，故主要根系仍分布於表層。而構樹之相關係數皆為負值，其原因可能是土壤之非均質性所致，也可能代表構樹對高污染土壤之逆境反而降低其吸收能力。

表 4-25 土壤與植體重金屬含量分析結果

重金屬 樣品	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
mg/kg						
白楊 1						
BP1-30	559	240	380	12097	N.D	63.6
BP1-60	443	191	349	11043	N.D	47.9
BP1-100	392	182	363	12719	N.D	61.7
BP1-120	649	312	558	22125	N.D	59.8
BP1-平均值	511	231	413	14496	N.D	58.3
植體	5.56	8.31	13.1	2164		
白楊 2						
BP1-2-30	959	434	646	27386	N.D	90.3
BP1-2-60	1054	433	752	29433	N.D	104
BP1-2-100	869	383	643	25944	N.D	72.1
BP1-2-120	413	237	558	15740	N.D	55.8
BP1-2-平均值	824	372	650	24626	N.D	80.7
植體	7.54	12.7	11.3	1918		
血桐 1						
BP1-30	827	460	595	32902	N.D	110
BP1-60	1312	781	111	57510	N.D	141
BP1-平均值	1070	621	353	45206	N.D	125
植體	4.66	1.08	5.19	25.4		
血桐 2						
BP1-2-30	801	337	628	20364	N.D	123
BP1-2-60	1050	506	1252	42610	N.D	164
BP1-2-平均值	926	421	940	31487	N.D	143
植體	6.25	3.00	7.66	103		
構樹 1						
BP1-30	327	138	241	14330	N.D	68.9
BP1-60	237	155	364	9432	N.D	44.6
BP1-平均值	282	146	303	11882	N.D	56.8
植體	7.00	6.00	9.32	315		
構樹 2						
BP1-2-30	713	234	398	15019	N.D	70.2
BP1-2-60	682	202	358	11276	N.D	66.0
BP1-2-平均值	698	218	378	13148	N.D	68.1
植體	6.41	1.39	7.37	78.0		

表 4-25(續)

重金屬	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
編號	mg/kg					
白楊 1						
BP2-30	320	113	145	4504	N.D	47.6
BP2-60	424	110	151	5055	N.D	48.1
BP2-100	205	78.0	113	4354	N.D	44.3
BP2-120	329	137	181	7394	N.D	58.8
BP2-平均值	320	110	148	5327	N.D	49.7
植體	8.07	8.90	14.4	1657		
白楊 2						
BP2-30	297	166	394	14288	N.D	130
BP2-60	120	73.3	225	4737	N.D	105
BP2-100	225	127	339	8864	N.D	116
BP2-120	79.8	71.3	129	2896	N.D	77.9
BP2-平均值	180	109	272	7696	N.D	107
植體	10.3	6.17	11.7	888		
血桐 1						
BP2-30	393	249	606	29695	N.D	65.1
BP2-60	405	227	632	22012	N.D	131
BP2-平均值	399	238	619	25854	N.D	98.1
植體	9.33	4.18	8.67	213		
血桐 2						
BP2-30	150	96.8	412	5624	N.D	244
BP2-60	224	134	471	11101	N.D	187
BP2-平均值	187	115	442	8363	N.D	216
植體	7.86	2.16	11.6	55.1		
構樹 1						
BP2-30	204	93.7	157	4135	N.D	32.2
BP2-60	668	318	453	13760	N.D	66.3
BP2-平均值	436	206	305	8948	N.D	49.3
植體	10.3	2.67	9.06	203		
構樹 2						
BP2-30	219	101	181	5350	N.D	41.2
BP2-60	327	155	364	9003	N.D	55.0
BP2-平均值	273	128	273	7177	N.D	48.1
植體	N.D	6.30	13.6	1013		

表 4-25(續)

重金屬 編號	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
mg/kg						
白楊 1						
BP3-30	521	272	370	9057	N.D	100
BP3-60	106	60.8	58.8	6298	N.D	16.9
BP3-100	863	262	237	1492	N.D	32.6
BP3-120	51.9	35.0	34.4	755	N.D	13.0
BP3-平均值	385	157	175	4401	N.D	40.6
植體	7.26	12.7	8.67	2191		
白楊 2						
BP3-30	413	189	224	7925	N.D	33.0
BP3-60	405	160	182	6904	N.D	28.5
BP3-100	140	64.5	76.7	2380	N.D	21.1
BP3-120	79.3	43.8	47.5	1148	N.D	16.6
BP3-平均值	259	114	133	4589	N.D	24.8
植體	9.79	10.8	6.80	2022		
血桐 1						
BP3-30	1153	337	557	16017	N.D	74.4
BP3-60	1333	393	597	23094	N.D	81.0
BP3-平均值	1243	365	577	19556	N.D	77.7
植體	7.11	8.31	8.12	95.7		
血桐 2						
BP3-30	798	712	1292	7236	N.D	77.9
BP3-60	1054	577	356	21404	N.D	36.1
BP3-平均值	926	644.5	824	14320	N.D	57.0
植體	9.80	6.29	7.90	189		
構樹 1						
BP3-30	786	301	287	9859	N.D	46.1
BP3-60	1058	328	484	15130	N.D	58.5
BP3-平均值	922	315	386	12495	N.D	52.3
植體	6.40	6.39	6.14	189		
構樹 2						
BP3-30	1714	455	377	14369	N.D	76.9
BP3-60	1057	730	640	5108	N.D	49.6
BP3-平均值	1386	593	509	9739	N.D	63.3
植體	6.10	3.60	5.49	147		

表 4-25(續)

重金屬 編號	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
mg/kg						
白楊 1						
PR1-30	1262	1096	1463	54490	N.D	101
PR1-60	1742	1351	1467	72489	N.D	94.3
PR1-100	1465	1224	1693	49645	N.D	134
PR1-120	1739	1345	1496	66683	N.D	97.1
PR1-平均值	1552	1254	1530	60827	N.D	107
植體	5.46	5.20	13.0	2671		
白楊 2						
PR1-30	1702	1311	1414	51015	N.D	72.8
PR1-60	874	659	965	34060	N.D	62.3
PR1-100	702	576	976	41808	N.D	84.6
PR1-120	823	652	1005	42054	N.D	87.4
PR1-平均值	1025	800	1090	42234	N.D	76.8
植體	14.98	4.39	17.83	873		
血桐 1						
PR1-30	880	459	1007	48584	N.D	118
PR1-60	909	438	1266	44862	N.D	106
PR1-平均值	895	449	1137	46723	N.D	112
植體	5.91	2.11	7.51	141		
血桐 2						
PR1-30	229	124	268	12349	N.D	50.1
PR1-60	305	153	347	17217	N.D	49.7
PR1-平均值	267	139	308	14783	N.D	49.9
植體	11.6	3.52	10.0	107		
構樹 1						
PR1-30	624	434	681	41628	N.D	118
PR1-60	675	540	845	47350	N.D	167
PR1-平均值	650	487	763	44489	N.D	143
植體	7.55	2.16	6.45	92.6		
構樹 2						
PR1-30	672	516	826	41227	N.D	138
PR1-60	829	435	978	50513	N.D	172
PR1-平均值	650	487	763	44489	N.D	143
植體	7.04	0.25	4.75	43.0		

表 4-25(續)

重金屬 編號	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
mg/kg						
白楊 1						
PR2-30	1491	681	881	59932	N.D	82.0
PR2-60	1154	499	792	65365	N.D	72.1
PR2-100	255	135	170	11514	N.D	44.0
PR2-120	168	101	123	7729	N.D	35.0
PR2-平均值	767	354	492	36135	N.D	58.3
植體	4.89	3.79	8.84	1527		
白楊 2						
PR2-30	423	271	328	14321	N.D	59.0
PR2-60	261	225	191	6563	N.D	43.4
PR2-100	71.0	90.4	93.0	3547	N.D	35.1
PR2-120	30.7	48.5	47.7	1568	N.D	26.7
PR2-平均值	423	271	328	14321	N.D	59.0
植體	7.42	6.70	9.98	943		
血桐 1						
PR2-30	1050	439	665	35679	N.D	114
PR2-60	223	93.71	151	5891	N.D	32.2
PR2-平均值	637	266	408	20785	N.D	73.1
植體	11.8	3.07	5.05	92.1		
血桐 2						
PR2-30	543	205	267	7451	N.D	55.3
PR2-60	713	122	202	4260	N.D	27.5
PR2-平均值	628	164	235	5856	N.D	41.4
植體	14.1	2.64	8.74	92.6		
構樹 1						
PR2-30	2091	381	1421	54847	N.D	59.7
PR2-60	2015	390	1334	50794	N.D	64.0
PR2-平均值	2053	386	1378	52821	N.D	61.9
植體	7.21	2.47	7.61	50.2		
構樹 2						
PR2-30	1575	361	556	30957	N.D	59.4
PR2-60	1283	440	889	59398	N.D	84.7
PR2-平均值	1429	401	723	45178	N.D	72.1
植體	11.9	3.21	6.73	142		

表 4-26 土壤與植體重金屬含量之相關係數(r)

樹種	深度(cm)				四土層含量 平均值
	30	60	100	120	
白楊	0.08	0.34	0.23	0.38	0.22
構樹	-0.39	-0.32	---	---	-0.34
血桐	0.25	0.07	---	---	-0.08

註：---表示未採該土層土壤故無計算值

4.7 復育效益評析

依據上述成果，本計畫之執行效益可分為復育生物適應性、TPH改善效益及重金屬改善效益三部分綜合評析如下：

一、復育生物適應性評析

本項評析係針對施放之蚯蚓、石化分解菌與各類復育植物對本場址污染物之耐受力加以探討，其依據為蚯蚓與石化分解菌之計量調查，以及各類植物之生育調查及生理試驗結果。

(一) 蚯蚓與石化分解菌計量調查成果

如上所述，本年度所進行之 2 次蚯蚓計量調查結果發現，其平均密度約為每平方公尺 61 隻，且多集中於 0~15 公分，顯示施放之蚯蚓在表土層的生長狀況良好。而石化分解菌之鑑定結果顯示，在本場址之土壤樣品中總計鑑別出 20 門，358 屬菌種，而植入之分解菌佔全部菌種數之 1.7%，由此結果可知，分解菌確能耐受本場之污染環境，進而發揮降解效果。

(二) 復育植物生育調查成果

本計畫前三年對白楊所進行之生育調查結果顯示，白楊雖有長達半年之落葉期，但其餘時間則成長快速，二年餘之平均樹高已達 252~318 公分，成長率高達 245~410%，顯見白楊確可適應污染物並快速生長，對污染改善將有相當正面之效益。而血桐與構樹經一年餘栽植後，其成長率分別為血桐之 130~360%與構樹之 678~1941%，且由外觀可知其生長狀況尚屬正常。不過，就其成長率而言，構樹之對照區有顯著高於復育區之現象，表示此階段污染物對構樹之生長有影響，

惟此現象是否導因於植株生長期短而尚未成熟之故，長成後是否逐漸適應而逐漸趨於一致，有待後續之試驗與觀察。

至於太陽麻部分，本年度所播植的兩次太陽麻生育調查數據指出，無論是株高或乾重都以 CK 區之值最大，顯示污染物對太陽麻之生長皆有程度不一的影響。而本年度第二次（栽種期為 4~7 月）之株高與乾重量測平均值皆大於第一次（栽種期為 2~4 月），此差異顯示溫度高低、日照長短及雨量多寡對其成長皆有影響。不過，由其外觀與整體發育情形可知，太陽麻大致仍呈現相當之污染適應能力。

（三）復育植物生理試驗成果

連續三年餘對白楊所做之淨光合作用率及葉綠素螢光 F_v/F_m 值測定，兩項結果都顯示，復育區除 PR2 外植物生長狀況良好，且與對照區無明顯落差，顯然可以忍受並適應污染場址之生長條件，故為本污染場址適合之復育植物。至於栽植二年餘之血桐與構樹，淨光合作用率與葉綠素螢光 F_v/F_m 值之測定結果皆顯示，其測值呈現逐次上升趨勢，且多數葉綠素螢光 F_v/F_m 值皆在 0.75 以上，顯示兩種本土植物已逐漸適應污染環境。整體而言，目前之生理試驗結果顯示，污染物或氣候對復育植物雖有程度不一之影響，但所有復育植物仍然可以忍受並逐漸適應污染場址，故皆為具復育潛力之植物。

二、TPH 改善效益評析

本項效益係以復育生物與植物的生育與生理試驗結果，配合採集土壤樣品之 TPH 濃度變化評析之。

由上述蚯蚓、石化分解菌與復育植物在計畫場址之適應情況，並對照土樣之 TPH 分析結果可知，各試驗區之 TPH 濃度隨著時間雖仍有高低不規則之變化，但各區之最高濃度大體上呈現降低趨勢；而就各試驗區之同一深度土層觀之，除部分土層可能因為土壤之非均質性而出現濃度不減反增之現象外，其餘土層皆有程度不一之降解效果，減量百分比介於 19%~97%，且各區的改善效果相當。此結果顯示，除土壤環境之自然衰減機制外，本計畫之生物與植生復育處理，對 TPH 污染改善亦具相當效益。惟因本場址之污染甚嚴重，且又為較難分解之高碳數碳氫化合物，故雖經三年餘之復育，大多數土層之 TPH 濃度仍高於土壤污染管制標準。

三、重金屬改善效益評析

本項效益係以修剪或收成的植體重金屬含量，配合其重量計算而得的吸收移除量評析之。

本年度共栽種且收穫之草本植物為太陽麻與牛筋草，而木本植物為白楊、血桐與構樹，收成或修剪後之植體經烘乾後秤重，且進行重金屬含量分析，再由其乾重與重金屬濃度計算吸收移除量。所得結果分為草本與木本植物兩部分：

(一)草本植物之重金屬吸收移除量

表 4-27 為本期之太陽麻及牛筋草乾重，而重金屬分析結果則列於表 4-22 及表 4-23。由兩者計算而得的重金屬吸收移除量分別列於表 4-28 與表 4-29，而兩者之和即為草本植物之重金屬移除量（表 4-30）。由表列資料可知，牛筋草之生質量與植體重金屬含量皆高於太陽麻，故有較高之吸收移除量，分別為太陽麻 Zn (4.18 g) > Cu (0.12 g) > Cr (0.07 g) > Ni (0.04 g)，牛筋草 Zn (251.5 g) > Cu (8.85 g) > Cr (7.36 g) > Ni (6.53 g)，兩者合計為 Zn (255.7 g) > Cu (8.97 g) > Cr (7.43 g) > Ni (6.57 g)，故而牛筋草為較佳之草本復育植物，加以牛筋草無需播植且繁殖力強，未來可以此優勢草種做為淺層污染土壤之復育植物並推廣之。若與 103 年度之草本植物吸收量比較，以 Zn 為例，成長將近 11.6 倍，且多為牛筋草之貢獻，更突顯牛筋草為優良之復育能力。

表 4-27 各復育區草本植物乾重

編號	第一期 太陽麻	第二期 太陽麻	第一期 牛筋草	第二期 牛筋草
	kg			
BP1	1.20	1.92	7.2	9.1
BP2	0.90	0.62	7.8	9.8
BP3	1.08	0.52	15.3	10.7
PR1	2.10	1.04	10.6	9.0
PR2	0.90	0.76	27.0	20.1
合計	6.18	4.86	67.9	58.6

註：表中各值為太陽麻 10 顆或牛筋草 10 叢植株之平均值

表 4-28 太陽麻之重金屬移除量

編號	Cr	Cu	Ni	Zn
	mg			
第一期移除量				
BP1	6.26	9.96	5.22	630
BP2	5.34	8.57	2.86	244
BP3	6.32	10.9	3.87	485
PR1	12.2	21.2	4.62	520
PR2	5.73	16.8	5.24	336
小計	35.8	67.4	21.8	2215
第二期移除量				
BP1	10.2	16.2	10.0	1009
BP2	3.68	5.95	2.00	168
BP3	3.07	5.35	1.89	234
PR1	6.14	10.7	2.33	262
PR2	7.3	14.8	4.5	288.3
小計	30.4	53.0	20.7	1961.3
合計	66.2	120.4	42.5	4176.3

表 4-29 牛筋草之重金屬移除量

編號	Cr	Cu	Ni	Zn
	mg			
第一期移除量				
BP	3208	4045	2854	73647
PR	666	805	667	63240
小計	3874	4850	3521	136887
第二期移除量				
BP	2893	3318	2445	61454
PR	589	682	564	53113
小計	3481	4000	3009	114567
合計	7355	8850	6530	251454

表 4-30 草本植物之重金屬移除量

植物別	Cr	Cu	Ni	Zn
	g			
太陽麻	0.07	0.12	0.04	4.18
牛筋草	7.36	8.85	6.53	251.5
104 年草本植物移除量	7.43	8.97	6.57	255.7
103 年草本植物移除量	0.27	0.67	0.50	22.0

(二)木本植物之重金屬移除量

木本植物之重金屬移除量係以剪除枝葉之乾重與其重金屬分析值計算之。表 4-31 為白楊剪除枝葉之乾重，以及依據植體重金屬分析值（表 4-24）計算而得之重金屬移除量，亦即白楊修剪一次之重金屬移除量，依序為 Zn (160 g) > Ni (1.11 g) > Cr (0.78 g) > Cu (0.73 g)。

表 4-31 白楊剪除枝葉之乾重與重金屬移除量

編號	乾重	移除量			
		Cr	Cu	Ni	Zn
	kg	mg			
BP1	16.0	105	168	195	32660
BP2	15.2	140	115	198	19346
BP3	18.7	160	220	145	39396
PR1	24.0	245	115	370	42528
PR2	21.1	130	111	199	26059
合計	95.0	779	728	1106	159988

其次，依上述方法計算血桐及構樹之移除量。表 4-32 與表 4-33 分別為血桐及構樹剪除枝葉之乾重，以及依據植體重金屬分析值（表 4-24）計算而得之重金屬移除量。由表中資料可知，血桐對重金屬之吸收移除量依序為 Zn (7.61 g) > Cr (0.64 g) > Ni (0.54 g) > Cu (0.25 g)，構樹則為 Zn (13.6 g) > Ni (0.48 g) > Cr (0.46 g) > Cu (0.19 g)，構樹對鋅之移除量高於血桐，其它三元素則差異不大，且都小於白楊之移除量。

然後，將白楊、血桐及構樹之移除量加總即得木本植物修剪一次之重金屬移除量(表 4-34)，依序為 Zn (181.2 g) > Cr (1.88 g) > Ni (1.75 g) > Cu (1.55 g)。由於木本植物每年預計修剪二次，故全年移除量以第一次計算值的二倍估算之。由於白楊已栽種三年餘，血桐及構樹為兩年餘，且曾於 103 年度計算其重金屬移

除量（表4-34），比較兩年度之值可知，由於木本植物持續成長，剪除之枝葉增加，故移除量亦大幅提升，以Zn而言，增加量約為1.4倍，整治效益逐漸提升。

表 4-32 血桐剪除枝葉之乾重與重金屬移除量

編號	乾重	移除量			
		Cr	Cu	Ni	Zn
	kg	mg			
BP1	9.0	49	18	58	580
BP2	14.2	122	45	144	1907
BP3	13.1	111	96	105	1867
PR1	11.6	101	33	102	1435
PR2	19.7	255	56	136	1819
合計	67.6	638	248	544	7608

表 4-33 構樹剪除枝葉之乾重與重金屬移除量

編號	乾重	Cr	Cu	Ni	Zn
	kg	mg			
移除量					
BP1	6.0	40	22	50	1178
BP2	14.0	72	63	158	8512
BP3	5.0	31	25	29	840
PR1	20.0	146	24	112	1356
PR2	18.1	173	51	130	1739
合計	63.1	463	186	479	13625

表 4-34 全年木本植物之重金屬移除量

期別	Cr	Cu	Ni	Zn
	g			
白楊	0.78	1.11	0.73	160
血桐	0.64	0.25	0.54	7.61
構樹	0.46	0.19	0.48	13.6
第一次移除量	1.88	1.55	1.75	181.2
104 年移除量	3.96	3.10	3.50	362.4
103 年移除量	0.95	1.36	1.28	261.0

(三)復育植物之重金屬總移除量

依據上述草本與木本植物之重金屬移除量，將本年度所收成或剪除之太陽麻、牛筋草、白楊、血桐及構樹之重金屬移除量加總後即得全年總移除量，亦即本年度對重金屬之植生復育效益（表4-35）。依序為Zn（618.1 g）>Cu（12.07 g）>Cr（11.39 g）>Ni（10.07 g）。以本場址五個處理區的總面積為186.67 m²，若以前述之污染深度（1.2 m）與土壤總體密度（1.3x10³ kg/m³）為基準，則計算所得之土壤總重量為291,205 kg，故復育植物每年自每公斤土壤中所移除之重金屬分別為Zn（2.12 mg）>Cu（0.041 mg）>Cr（0.039 mg）>Ni（0.035 mg）。表中資料也顯示，本年度所有復育植物對重金屬之吸收移除總量高於103年，以污染最嚴重之鋅為例，增加約2.2倍，整治效益明顯提升。

表 4-35 全年復育植物之重金屬總移除量

植物種類	Cr	Cu	Ni	Zn
	g			
木本植物	3.96	3.10	3.50	362.4
草本植物	7.43	8.97	6.57	255.7
104 年總移除量	11.39	12.07	10.07	618.1
103 年總移除量	1.22	2.03	1.78	283.0

若以各試驗區之面積、污染深度與土壤總體密度計算各區土壤中之重金屬污染量並予加總，可得本場址五個復育區之重金屬總含量分別為 Zn 1094 kg、Ni 34.0 kg、Cu 20.1 kg、Cr 15.8 kg，相較於本年度各重金屬之移除量，其移除之比例仍低。不過，由於木本植物持續增長而增加生質量，將可大幅提高其移除量。以主要污染物 Zn 為例，由污染區復育植物所移除之重金屬量(618.1 公克/年)，與土壤中鋅之總推估量(1,094 公斤)相較，欲達整治目標，約需 1770 年，與 103 年所估算的 3866 年相較已明顯縮短。而如上所述，未來木本植物長大成熟後，其生質量估計可增至 10~20 倍，加以牛筋草的高移除量，將可縮短復育期程至約 100 年。對照 McGrath (1998)的研究所指，若植物對 Zn 之吸收累積量為 1000 ppm 時，整治時間約為 247 年；Luca et al. (2004)以白楊整治工業區重金屬污染土壤的結果也指出，整置期程約須 166.2 年；Siva Ananthi (2012)以蓖麻等能源作物改善重金屬污染土壤的結果也指出，欲以植生法去除 500 mg/kg 的 Pb 約需 25~50 年，可見植生復育須時較長乃常見現象。相較於有機污染物較快速之復育成果，重金屬之植生復育效益顯然緩慢甚多，不過，由於此法所花費資源較少，對符合綠色整治要件之污染場址仍為可行復育方法之一。

(四)復育植物之單顆(株)重金屬移除量

本年度進一步計算木本及草本之單顆(株)移除效益，其方法亦以污染最嚴重的 Zn 為對象，將所有復育植物對 Zn 之移除量分別除以其栽植棵（株）數，即可得到單顆植物之移除量(表 4-36)。

首先就草本植物觀之，本年度共收成二期太陽麻，Zn 總移除量為 4176.3 mg，平均一期移除量為 2088.2 mg，五個復育區之總面積為 186.67 m²，每 m² 之播植數量約為 50 株，依此計算而得的太陽麻單株移除量為 224 μg。此結果與 Russell et al. (2013)在鋅濃度為 100 ppm 土壤中栽植太陽麻所得的每株吸收累積量 204±39 μg 相近，但因本場址的鋅濃度較高，相較之下本案之吸收累積量並不突出。其次，本年度也拔除二次牛筋草，Zn 總移除量為 251454 mg，平均一期移除量為 125727 mg，經實地調查發現每 1 m² 約有 30 叢牛筋草，而每叢牛筋草約有 12 株，依此計算而得的單株移除量為 1871 μg。相較之下牛筋草對鋅之吸收移除效益高於太陽麻。

再就木本植物觀之，本年度修剪一次所計算而得的白楊、血桐及構樹的 Zn 總移除量分別為 160 g、7.61 g 及 13.6 g，而五個復育區的栽植數量分別為 61 顆、16 顆及 37 顆，依此計算而得的單株移除量分別為白楊 2.62 g、血桐 0.48 g 及構樹 0.37 g。相較之下木本植物對鋅之吸收移除效益依序為白楊>血桐>>構樹。而 Luca et al. (2004)以白楊整治工業區重金屬污染土壤的結果指出，單株移除量為 0.66~0.97 g，顯然本計畫之移除量較大，其可能原因為本場址之土壤鋅濃度高於該研究之污染濃度 10300 mg/kg。

表 4-36 復育植物之重金屬單顆(株)移除量

植物種類	栽（播） 植數量	一期 移除量	單顆(株) 移除量
草本植物			
單位	株	mg	μg
太陽麻	9334	4176.3	224
牛筋草	67201	125727	1871
木本植物			
單位	顆	g	g
白楊	61	160	2.62
血桐	16	7.61	0.48
構樹	37	13.6	0.37

(五)操作維護成本

生物及植生復育法係耗時較長的整治工法，但確屬成本相對較低及管理容易之綠色工法。以本案為例，未來若持續進行，在不採樣分析前提下，其操作維護費用估計每年約需 290,000 元，包括水電及設施維護費 30,000 元，植栽管理費用(含平日澆水與病蟲害防治及施肥)90,000 元，復育生物施放費(分解菌及蚯蚓各三次)90,000 元，植物修剪及處理費(四次)80,000 元。

四、植生與生物復育法在本場址應用性評析

一般而言，植生復育法具有技術簡單、管理容易、成本低廉、環境友善及適用廣泛等優點。然而也有其限制條件，包含復育期程長，植物對污染物之適應，根系能否涵蓋污染範圍，大量植體之移除與處理等，生物復育法亦類似 (Bani, et al., 2015；Bieby et al., 2011；Luca et al., 2004)。

依本計畫之執行經驗評析植生與生物復育法在本場址之應用性，由於蚯蚓及石化分解菌絕大多數活動於表土層(0~15cm)，對深層污染物無法產生降解效益。而本場址之污染油品又屬不易降解之高分子量物種，且污染濃度甚高，故而改善效果與現地生物所產生的「自然降解」並無明顯差別。不過，一般以「土耕法」改善汽柴油等污染土壤常有快速而明顯效益，除此類低分子量有機物較易揮失與降解外，定期密集翻土並配合植入復育生物亦是主因，故而若能依此方式進行，或可提高整治效益，但因本場址同時進行植物復育，故而無法翻土，以致改善效果受限。就此經驗而論，未來對同時遭受 TPH 與重金屬污染的場址，或可試行先 TPH 後重金屬之整治列車方式復育之。

再就植生復育論之，本案雖已同時進行草本(淺根系)與木本(深根系)復育植物之栽種，但草本植物收成時所量測的根系分佈約在 0~20 公分，而由土壤與植體重金屬含量之相關性分析結果可知，以白楊為例，隨著生長期雖然根系影響深度可達 100 公分以上，但所有復育植物的根系分佈並無法完全涵蓋所有污染土壤，亦即並非所有污染土壤皆能接觸根部而進行污染物攝取，復因本場址之重金屬濃度甚高，故而雖然三年來證實木本植物白楊、血桐、構樹與草本植物牛筋草、太陽麻皆有相當之重金屬移除能力，但卻無法均勻降低所有土壤之污染量，且改善期程可能長達百年，故而無法在短期內單以植生復育達到整治目標。

雖然三年餘之整治經驗發現上述限制，然而由於本場址並無污染擴散現象，亦無健康危害風險，且土地亦可供長期改善之用，故而植生與生物復育仍為值得選擇之友善環境復育工法。

4.8 章節摘要

本期之執行成果為：

一、試驗區管理

每天以自動噴灑設施及人工灑水，且依預定進度定期清除雜草、施肥、噴灑農藥防治病蟲害，以維持場址之妥適試驗環境。

二、生物復育試驗施作

已於三個生物復育區依預定進度進行二次蚯蚓施放與分解菌施灑。

三、植生復育試驗施作

已依預定進度完成二次生育調查與生理試驗，且完成二期太陽麻栽植與收成，並進行二次計畫外之牛筋草拔除，且完成植體採樣分析。

四、土樣採集與分析

(一)土壤之 TPH 分析結果顯示，各復育區之最高濃度都有不同程度之降低趨勢。

若就各區之同一深度土層觀之，各復育區之 TPH 濃度隨著時間雖仍有高低不規則之變化，但多數呈現降低趨勢，除部分因土壤非均質性所導致之濃度不減反增土層外，三個生物復育區各土層之減量百分比介於 33%~97%，而植生復育區之減量百分比則為 19%~81%。

(二)土壤重金屬分析結果顯示，主要污染重金屬（Zn、Cr、Cu、Ni）在各試驗區同一土層之濃度呈無規則之變化趨勢，且大多數仍高於土壤污染管制標準，顯見在此高污染場址中，植生復育對重金屬污染之短期改善效果十分有限。

五、植物生理試驗與草本植體分析

(一)就所有木本與草本植物所進行之生育調查，以及木本植物之生理試驗(淨光合作用率及葉綠素螢光 F_v/F_m 值)等結果都顯示，整體而言各類植物均可適應此環境，故皆可做為本污染場址之復育植物。

(二)就植體分析結果觀之，土壤中污染量最高之Zn，在各類植體中皆有明顯之吸收累積量，其餘三個主要污染元素Cu、Cr、Ni則差異不大，不過略呈Cu>Cr>Ni之現象。

六、復育效益評析

(一)復育生物之適用性評析

就所有復育植物所進行之生育調查及木本植物之生理試驗等結果都顯示，僅於少數復育區出現木本植物之逆境徵狀，但整體而言均可忍受此環境，皆可做為本污染場址之復育植物。此外，對蚯蚓進行的計量調查發現，平均每平方公尺約為61隻，顯示施放之蚯蚓生長狀況良好；而土壤樣品中總計鑑別出20門，358屬菌種，而植入之石化分解菌佔全部菌種數之1.7%，由此可知，分解菌確能耐受本場之污染環境，進而發揮降解效果。

(二)TPH降解效果評析

連續三年餘以五種植物對污染場址進行植生復育，以蚯蚓及石化分解菌進行生物復育，就歷次之土壤TPH分析資料可知，各復育區之TPH濃度大體上呈現降低趨勢，多數復育區都有不同比例之減量效果，顯示兩種復育工作對TPH有程度不一之降解效果。

(三) 復育植物之重金屬移除效益評析

本項評析係將採集之各類植體進行重金屬含量分析，再由其生質量與植體重金屬濃度計算其吸收移除量。本年度將所有修剪或收成之植體依其生質量與重金屬含量計算吸收移除量，結果得知，所有植物對四種污染重金屬之吸收移除量依序為Zn (618.1 g) > Cu (12.07 g) > Cr (11.39 g) > Ni (10.07 g)。而每年自每公斤土壤中移除之重金屬量分別為Zn(2.12 mg) > Cu(0.041 mg) > Cr(0.039 mg) > Ni (0.035 mg)。若與103年度之吸收移除量比較，本年度明顯提高，以污染最嚴重之鋅為例，增加約2.2倍，整治效益明顯提升。

第五章、後續工作重點

本年度為署核定最後一年計畫，預定之工作項目已執行完畢，而到本案結束(11/30)前之主要工作為持續管理試驗區，以提供復育生物(蚯蚓及石化分解菌)與復育植物(白楊、構樹、血桐及牛筋草)妥適的生長環境，持續改善污染。

參考文獻

- 台灣大百科全書網站，2013，<http://taiwanpedia.culture.tw/web>.
- 吳翊豪，2009，六種植物吸收重金屬之植生復育法研究，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文。
- 李芳胤、郭耀綸、許正一、賴文亮，2013，屏東縣九如鄉九清段 1340 地號生物整治現地試驗(第二年)，102 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗成果發表會會議手冊，第 49-52 頁。
- 林浩潭、陳素文、沈季蓉、翁愷慎，2005，重金屬污染土壤以本土植物復育之探討，植物保護學會會刊，第 47 期，第 241-249 頁。
- 陳士賢、李芳胤、郭耀綸、許正一，2012，屏東縣九如鄉九清段 1340 地號生物整治現地試驗，行政院環境保護署期末報告。
- 陳士賢、陳師慶、梁世雄，2009，以微生物及蚯蚓發展石化污染土壤之環境復育技術，期末報告，行政院環境保護署。
- 陳士賢、陳師慶、梁世雄，2011，應用生物反應槽進行石化污染物之生物復育研究，期末報告，行政院環境保護署。
- 程淑芬、陳國霖、林聖杰、陳琦穎、陳家榮，2013，以綠能作物復育重金屬污染土壤之可行性研究(第二期)，102 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗成果發表會會議手冊，第 33-38 頁。
- 葉琮裕、吳佳峻，2013，整合型植生復育提升能源作物向日葵整治重金屬之研究，102 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗成果發表會會議手冊，第 39-44 頁。
- 維基百科，2013，<http://zh.wikipedia.org/zh-tw>.
- 賴鴻裕、陳尊賢，2003，重金屬污染土壤之植生復育技術與案例分析。第八屆土壤污染整治研討會論文集，第167-201頁，國立台灣大學，台北市，台灣。
- 賴鴻裕，陳尊賢，2005a，添加化學藥劑對促進重金屬污染土壤植生萃取之可行性評估，第九屆土壤及地下水污染整治研討會，第75-92頁，國立台灣大學，台北市，台灣。

- 賴鴻裕，陳尊賢，2005b，台灣利用花卉植物移除土壤重金屬相關研究之回顧，人工濕地與植物復育生態工程技術研討會，國立中山大學，高雄市，台灣。
- 賴鴻裕、盧至人，2007，植生復育重金屬污染土壤-國內研究之回顧及大豆生質能應用之探討，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第二十二期，第9-19頁。
- An, Y-J. 2005. Assessing soil ecotoxicity of methyl tert-butyl ether using earthworm bioassay; closed soil microcosm test for volatile organic compounds. *Environmental Pollution*. 134: 181-186.
- Bani, A., G. Echevarria, S. Sulce, and L.J. Morel. 2015. Improving the agronomy of *Alyssum murale* for extensive phytomining: a five-year field study. *Int. J. Phytoremediat.* 17:117-127.
- Bieby V. T., S. R. S. Abdullah, H. Basri, M. Idris, N. Anuar, and M. Mukhlisin. 2011. A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*. 2011:1-31.
- Bohlen, P. J., P. M. Groffman, T. J. Fahey, M. C. Fisk, E. Suarez, D. M. Pelletier, and R. T. Fahey. 2004. Ecosystem consequences of exotic earthworm invasion of north temperate forests. *Ecosystems* 7: 1-12.
- Burgos, M. G., Winters, C. Sturzenbaum, S. R. Banderson, P. F. Kille, P., Morgan, A. J., 2005. Cu and Cd effect on the earthworm *Lumbricus rubellus* in the laboratory: multivariate statistical analysis of relationships between exposure, biomarkers, and ecologically relevant parameters. *Environmental Science & Technology*. 39:1757-1763.
- Cassidy, D.P., Hudak, A.J., 2001. Microorganism selection and biosurfactant production in a continuously and periodically operated bioslurry reactor. *Journal of Hazardous Materials*. 84(2-3): 253-64.
- Cavalca, L., Di Gennaro, P., Colombo, M., Andreoni, A., Bernasconi, S., Bestetti, G., 2000. Distribution of catabolic pathways in some degrading bacteria of a subsurface polluted soil. *Research Microbiology*. 151: 877-887.

- Cavalca, L., Dell'Amico, E., Andreoni, V., 2004. Intrinsic bioremediability of an aromatic hydrocarbon-polluted groundwater: diversity of bacterial population and toluene monooxygenase genes. *Applied Microbiology & Biotechnology*. 64(4):576-587.
- Carman, E.P., T.L. Crossman, and E.G. Gatliff. 1998. Phytoremediation of No. 2 fuel oil-contaminated soil. *Journal of Soil Contamination*. 7(4): 455-466.
- Chuang, S.C. and Chen, J.H.. 2002. A new record earthworm *Amyntus masatacae* (Beddard) (Megascolecidae: Oligochaeta) from Taiwan. *Acta Zoologica Taiwanica*. 13(2): 73-79.
- Collins, C. D., 2007, Implementing Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons. *Methods in Biotechnology*, 23(1): 99-108.
- Criticchley, C., 1998. Photoinhibition. In: *Photosynthesis*. A. S. Raghavendra (ed.), p.264-272. Cambridge University Press, Cambridge.
- Deeb, R. A., Hanson, J.R., Scow, K. M., Alvarez-Cohen, L. 2001. Substrate interactions in BTEX and MTBE mixtures by an MTBE-degrading isolate, *Environmental Science & Technology*, 35(2):312-317.
- Eijsackers, H., C. A. Van Gestel, S. De Jonge, B. Muijs, and D. Slijkerman. 2001. Polycyclic aromatic hydrocarbon-polluted dredged peat sediments and earthworms: a mutual interference. *Ecotoxicology*. 10(1): 35-50.
- Euliss, K., C. H. Ho, A. P. Schwab, S. Rock, M. K. Banks, 2008, Greenhouse and field assessment of phytoremediation for petroleum contaminants in a riparian zone. *Bioresource Technology*, 99: 1961-1971.
- Fiorenza, S., Rifai, H. S., 2003. Review of MTBE Biodegradation and Bioremediation. *Bioremediation Journal*. 7(1): 1-35.
- Gevao, B., Mordaunt, C., Semple, K.T. Pearce, T.G., Jones, K.C. 2001. Bioavailability of nonextractable (bound) pesticide residues to earthworm. *Environmental Science & Technology*. 35: 501-507.
- Huang, X.D., Y. El-Alawi, J. Gurska, B. R. Glick, B. M. Greenberg, 2005, A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent

- total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soils. *Microchemical Journal* 81:139-147.
- ISO (International Standard Organization), 1993. Standard Number No.11268–1. Soil Quality – Effects of Pollutants on Earthworms (*Eisenia fetida*) – Part I: Determination of Acute Toxicity Using Artificial Soil Substrate. ISO, Geneva.
- ISO (International Standard Organization), 1998. Standard Number No.11268–2. Soil Quality – Effects of Pollutants on Earthworms (*Eisenia fetida*) –Part II: Method for the Determination of Effects on Reproduction. ISO, Geneva.
- ITRC, 2009. Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, The Interstate Technology & Regulatory Council.
- Jager, T., Fleuren, R.H.E., Hogendoorn, A., Korte, G..D. 2003. Elucidating the routes of exposure for organic chemicals in the earthworm, *Eisenia andrei* (Oligochaeta). *Environmental Science & Technology*. 37: 3399-3404.
- Jager, T., Van Der Wal, L., Fleurgen, R. H. L. J., Barendregt, A., Hermens, J. L. M. 2005. Bioaccumulation of organic chemicals in contaminated soils: evaluation of bioassays with earthworms. *Environmental Science & Technology*. 39: 293-298.
- Jordahl, J. J., Foster, L., Schnoor, J. L., and Alvarez, P. J. J. 1997. Effect of Hybrid Poplar Trees on Microbial Population Important to Hazardous Waste Bioremediation. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 16:1318–1321.
- Kacálková, L., P. Tlustoš, and J. Száková. 2015. Phytoextraction of risk elements by willow and popular trees. *Int. J. Phytoremediat.* 17:414-421.
- Luca, S., S. Francesca, T. Roberto. 2004. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P. × euramericana*) exposed to industrial waste. *Environmental and Experimental Botany*. 52:79–88.
- Lukkari, T., M. Aatsinki, A. Vaisanen, J. Haimi. 2005. Toxicity of copper and

- zinc assessed with three different earthworm tests. *Applied Soil Ecology* 30: 133-146.
- Luo, C. L., Z. Shen, and X. Li. 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere*, 59: 1 – 11.
- McGrath, S.P., 1998. Phytoextraction for soil remediation. p. 261-287. In R. Brooks (ed.) Plants that hyperaccumulate heavy metals their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining. CAB International, New York, NY.
- Mengel, K., E. A. Kirby. 1986. Principles of Plant Nutrition. Maw-Chang Book Co., Taipei, Taiwan.
- OECD, 2004. Guideline for testing of chemical No. 222. Earthworm reproduction test (*Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*). OECD Publications, Paris, France.
- Parrish, Z. D., J. C. White, M. Isleyen, M. P. Gent, W. Iannucci-Berger, B. D. Eitzer, J. W. Kelsey, and M. I. Mattina. 2006. Accumulation of weathered polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by plant and earthworm species. *Chemosphere*. 64(4):609-618.
- Prince, R.C., 2000. Biodegradation of Methyl tertiary-Butyl Ether (MTBE) and Other Fuel Oxygenates. *Critical Reviews of Microbiology*. 26(3): 163-178.
- Rentz, J. A., B. Chapman, P. J. J. Alvarez, and J. L. Schnoor, 2003, Stimulation of hybrid poplar Growth in petroleum contaminated soils through oxygen addition and soil nutrient amendments. *International Journal of Phytoremediation*. 5(1):57-72.
- Russell, S., C. Saifone, A. P. Enzo, M. Francois, B. Mrinal, 2013, Heavy metal phytoremediation potential of a heavy metal resistant soil bacterial isolate, *Achromobacter* sp. strain AO22. *APCBEE Procedia*. 5:502-507.
- Scott-Fordsmand, J. J., D. Stevens, and M. McLaughlin. 2004. Do earthworm mobilize fixed Zinc from ingested soil? *Environmental Science & Technology*. 38: 3036-3039.

- Shen, H. P., C. F. Tsai, and S. C. Tsai. 2002. Description of a new earthworm belonging to the genus *Amyntus* (Oligochaeta: Megascolecidae) from Taiwan and its infraspecific variation to elevation. *Raff. Bulltin of Zoology*. 50(1): 1-8.
- Siva Ananthi, T. A., R. S. Meerabai1 and R. Krishnasamy. 2012. Potential of *Ricinus Communis* L. and *Brassica Juncea* (L.) Czern. under natural and induced Pb Phytoextraction. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*. 2(5):429-438.
- Sturzenbaum, S. R., O. Georgiev, A. J. Morgan, and P. Kille. 2004. Cadmium detoxification in earthworm: from genes to cells. *Environmental Science & Technology*. 38: 6283-6289.
- Sun, W. H., J. B. Lo, F. M. Robert, C. Ray and C. S. Tang. 2004. Phytoremediation of petroleum hydrocarbons in tropical coastal soils I. selection of promising woody plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 11(4):260-266.
- Tang, C. S. , W. H. Sun, M. Toma, F. M. Robert, and R. K. Jones, 2004, Evaluation of Agriculture-Based Phytoremediation in Pacific Island Ecosystems Using Trisector Planters. *International Journal of Phytoremediation*. 6(1):17-33.
- Tang, Y. T., T. H. B. Deng, Q. H. Wu, R. L. Qiu, Z. B. Wei, X. F. Guo, Q. T. Wu, M. Lei, T. B. Chen, G. Echevarria, T. Sterckeman, M. O. Simonnot, J. L. Morel. 2012. Designing cropping systems adapted to metal contaminated sites: a review. *Pedosphere* 22:470–488.
- Tsai, C. F., Shen H. P., Tsai S. C.1999. On some new species of pheretimoid earthworm (Oligochaeta,: Megascolecidae) from Taiwan. *Journal of National Taiwan Museum*. 52(2): 33-46.
- Vamerali, T., Bandiera, M., Mosca, G., 2010. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environ. Chem. Lett.* 8 (1), 1–17.
- Whalen, J. K. 2004. Spatial and temporal distribution of earthworm patches in corn field, hayfield and forest systems of southwestern Quebec, Canada.

Applied Soil Ecology 27: 143-151.

Wiedemeier, T. H., Rifai, H. S., Newell, C. J., Wilson, J. T., 1999. *Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface*, John Wiley & Sons, New York.

附錄 1 草本植物重金屬檢測品保數據

檢驗項目	偵測極限	查核樣品分析	重複樣品分析	添加樣品分析
	(MDL)	回收率	差異百分比	回收率
	mg/kg	%		
Zn	0.060	111	2.2	104
Ni	0.604	108	0.0	120
Cr	1.52	95.2	0.0	81.6
Cu	0.264	103	0.0	108

附錄 2 木本植物重金屬檢測品保數據

檢驗項目	偵測極限	查核樣品分析	重複樣品分析	添加樣品分析
	(MDL)	回收率	差異百分比	回收率
	mg/kg	%		
Zn	8.75	1.53	7.39	5.65
Ni	10.00	16.90	13.40	2.57
Cr	6.25	0.60	0.43	2.09
Cu	18.75	0.10	7.30	5.10

附錄 3 土壤可萃取性重金屬檢測品保數據

檢驗項目	偵測極限	查核樣品分析	重複樣品分析	添加樣品分析
	(MDL)	回收率	差異百分比	回收率
	mg/kg	%		
Zn	0.65	98.3	2.3	99.8
Ni	1.26	102.6	3.9	95.3
Cr	1.31	97.6	3.9	96.5
Cu	0.92	96.3	4.2	99.8

附錄 4 土壤重金屬檢測品保數據

檢驗項目	偵測極限	查核樣品分析	重複樣品分析	添加樣品分析
	(MDL)	回收率	差異百分比	回收率
	mg/kg	%		
Zn	1.78	2.99	2.26	1.99
Ni	14.11	0.37	1.77	4.12
Cr	16.56	2.18	1.07	4.64
Cu	4.00	0.94	0.90	2.21
Pb	7.67	0.80	1.71	4.25
Cd	2.89	0	0	1.13

附錄 5 土壤 TPH 檢測品保數據

分析項目	偵測極限	查核樣品分析	重複樣品分析	添加樣品分析
	(MDL)	回收率	差異百分比	回收率
	mg/kg	%		
高碳數之石油	6.56	77.9	2.7	120.3
低碳數之石油	0.078	116.3	10.6	84.2