

# 行政院環境保護署

## 102 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

### 屏東縣九如鄉九清段1340地號生物整治現地試驗（第二年）

#### 期末報告

主 辦 單 位 ：  行政院環境保護署

計畫執行單位 ： 大仁科技大學／環安系

計畫主持人 ： 李芳胤 教授

計畫執行期間 ： 101年12月10日起至

102年12月09日

## 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案 成果自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

### 1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估



達成目標



未達成目標（請說明，以 100 字為限）



實驗失敗



因故實驗中斷



其他原因

說明：已依預定進度完成各預定工作項目

### 2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☐已發表 ☐未發表之文稿 ☐撰寫中 ☐無

專利：☐已獲得 ☐申請中 ☐無

技轉：☐已技轉 ☐洽談中 ☐無

其他：☒已於 2013 年 6 月 27 日假台灣大學舉行之「台灣農業化學會第五十一次會員大會暨生物炭在農業與環境上之應用研討會」上，以「植生法整治重金屬污染土壤之探討」發表。

### 3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫場址為環保署公告之重金屬及總石油碳氫化合物（TPH）污染整治場址。計畫之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（白楊樹與太陽麻）改善污染。在場址內共設置六個試驗區，包括對照區、三個生物復育區與二個植生復育區。試驗結果發現，生物復育區土壤中之 TPH 濃度減量比介於 39%~100%，植生復育區則為 59%~100%，且部分土層之濃度已低於土壤污染管制標準。其次，生育調查與生理試驗之結果皆顯示，兩種復育植物在污染場址生長良好。最後以剪除植體之生質量與重金屬濃度計算其吸收移除量，結果發現，太陽麻與白楊樹對重金屬之總移除量分別為 Zn（84 g）>Cu（1.93 g）>Ni（1.45 g）>Cr（0.38 g）。此移除量若與試驗區推估之重金屬總含量相較，其移除比例雖然仍低，復育重金屬污染所需之期程亦甚長，但未來在白楊樹成長而增加生質量後，將可大幅縮減復育期至百年左右。此外，藉由本計畫之執行已達到整治污染場址、做為公有地整治表率、避免持續污染地下水、現地生物復育試驗之應用與植生復育之現場應用之目的。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。

## 計畫摘要

本計畫場址位於屏東縣九如鄉，範圍為 1,800 平方公尺，主要污染物為鋅、鉻、銅、鎳及總石油碳氫化合物（TPH）。計畫之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(白楊樹與太陽麻)改善污染。在場址內共設置六個試驗區，除對照區(CK)外，其餘有三個生物復育區(BP1、BP2、BP3)，二個為植生復育區(PR1、PR2)。在兩年的試驗後發現，三個生物復育區土壤中之 TPH 濃度減量百分比介於 39%~100%，植生復育區則為 59%~100%，且部分土層之濃度已低於土壤污染管制標準。而重金屬之測值指出，主要污染重金屬在各試驗區同一土層之濃度呈現不規則變化，且大多數仍高於土壤污染管制標準。其次，生育調查與生理試驗之結果皆顯示，兩種復育植物在試驗區中生長良好，有益於後續之污染物改善試驗。此外，兩種植體重金屬之測值都顯示，其吸收累積量以鋅最大，其餘略呈  $\text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr}$  之現象。最後以剪除植體之生質量與重金屬濃度計算其吸收移除量，結果發現，太陽麻與白楊樹對重金屬之總移除量，亦即本年度對重金屬之植生復育效益，分別為  $\text{Zn} (84 \text{ g}) > \text{Cu} (1.93 \text{ g}) > \text{Ni} (1.45 \text{ g}) > \text{Cr} (0.38 \text{ g})$ 。此移除量若與五個試驗區推估之重金屬總含量相較，其移除比例甚低，復育期將長達 12,905 年，惟當白楊樹長大後，其生質量估計可達目前之 60~100 倍，故可將復育時程縮短至約 100~200 年。

## Abstract

The contaminated site proposed in this study is located in Pingtung County with an area of 1,800 m<sup>2</sup>. 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 to compare the results with different remediation treatments. Earthworm (*E. fetida*) and petroleum-degrading bacteria (*Pseudomonas sp.* NKNU01) were applied for bioremediation, while Poplars (*Populus bonatii* Levl. ) and Sun Hemp (*Crotalaria juncea* L.) were utilized in the phytoremediation practice. Soil analysis results showed that the removal rate of TPH in the three bio-phytoremediation plots ranged from 39% to 99% and from 59% to 99% in the two phytoremediation plots. The analysis data also revealed that TPH was below regulation criteria in some soil horizons. However, heavy metal concentrations were not reduced obviously and thus most soils were still highly contaminated. Plant growth and physiological investigations indicated that the two plants were healthy and suitable to be used in this remediation study. The concentrations of heavy metals in the plant tissues were used to evaluate the removal efficiency of the contaminants. The results of tissue analysis indicated that the four metals were absorbed and accumulated in the order of Zn > Cu > Ni > Cr. To explore in more detail, the biomass and the heavy-metal contents of the studied plants were used to evaluate the removal amounts and the results were as follows: Zn (84 g) > Cu (1.93 g) > Ni (1.45 g) > Cr (0.38 g) . Comparing the heavy-metal removal amounts by plants to the total heavy-metal contents in soils, we found that the phytoremediation effect is low and hence it takes long-term practice to reach the recovery goal.

## 報告大綱

章節	內容概述	頁次
第一章 計畫緣起與目的	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。	1
	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。	9
	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。	11
	1.4 執行經費與期程：說明執行經費，並以甘特圖說明各工作項目之執行進度。	12
	1.5 章節摘要：簡要陳述本章之內容。	13
第二章 計畫背景	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。	15
	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。	18
	2.3 植生復育：介紹植生復育之原理與研究成果。	20
	2.4 章節摘要：簡要陳述本章之內容。	25
第三章 研究方法與過程	3.1 試驗區規劃：說明六個試驗區之位置與功能。	27
	3.2 試驗區管理：介紹澆水、除草、施肥與病蟲害防治方法。	28
	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。	28
	3.4 植生復育試驗施作：介紹樹種選擇與植栽規劃原則。	32
	3.5 土壤採集與分析：介紹土壤採集與分析方法。	34
	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。	34
	3.7 復育效益評析：植物適應性與復育成效評析、生物復育成效評析方法。	36
	3.8 污染防治及場址安全措施：說明安全衛生管理、緊急應變、二次污染防治之規劃。	36
	3.9 章節摘要：簡要陳述本章之內容。	39

## 報告大綱(續)

章節	內容概述	頁次
第四章 結果與 討論	4.1 試驗區規劃：說明澆水、除草、施肥與病蟲害防治之執行方法、內容與成果。	41
	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。	44
	4.3 植生復育試驗施作：說明白楊樹與太陽麻栽種、管理與收成之執行方法、內容與成果。	45
	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。	47
	4.5 植物生理調查與採樣分析：說明白楊樹與太陽麻生育調查、白楊樹生理試驗與植體重金屬分析成果。	63
	4.6 復育效率評估：以土壤 TPH 與重金屬之分析結果評析其復育效益，以白楊樹及太陽麻之重金屬分析結果進行移除效益評析。	72
	4.7 章節摘要：簡要陳述本章之內容。	76
參考 文獻	列出本計畫所有參考文獻。	79

## 專案成果摘要

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。2008 年 1 月屏東縣政府環境保護局接獲民眾之污染陳情，遂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 加侖鐵桶，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。稽查人員除依法禁止其污染行為並採取必要應變措施外，水污科並會同污染行為人及相關單位進場採集土壤樣品，分析重金屬（鉛、銅、鉻、鋅、鎳、鎳）及揮發性有機物(VOCs)。檢測結果顯示，銅、鉻、鋅、鎳及總石油碳氫化合物（Total petroleum hydrocarbons, TPH）超過土壤污染管制標準。環保局遂要求污染行為人提出改善措施，以減輕污染影響或避免污染擴大。污染行為人於 2008 年 6 月 30 日提出自行改善計畫書，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，經環保局審查通過後執行。但在限期後環保局於 2009 年 3 月 10 日針對場址改善成果進行驗證，採樣與檢測結果發現鉻、鋅及 TPH 仍超過管制標準，因此即依法於 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，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以管制或限制管制區內之土壤使用與人為活動。後來因公告之土壤污染控制場址面積甚大，經屏東縣環保局請求協助後，環境保護署遂進一步採樣分析以釐清污染範圍，其後於 2010 年 5 月 4 日公告本場址為土壤污染整治場址，面積為 1,800 平方公尺。屏東縣環保局隨後亦變更染控制場址面積為 1,800 平方公尺。

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。本計畫之主要目的與重要性為：(1)整治污染場址：期盼以現地試驗改善並整治重金屬及石油碳氫化合物污染，未來再循法律或其他途徑向污染行為人追索所發生之費用。(2)做為公有地整治表率：本計畫之執行將有政府整治污染場址(公有地)之表率與宣示效果。(3)避免持續污染地下水：本計畫之執行將可避免污染物之持續傳輸而進一步污染九如地區之地下水。(4)現地生物復育（Bioremediation）試驗之應用，即應用蚯蚓及微生物於污染場址以分解石化污染物。(5)植生復育（Phytoremediation）之現場應用：以生物復育搭配植生復育法改善污染。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。

本計畫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(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。本計畫之試驗項目包括試驗區管理、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。各項目之內容為：(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合適之生存環境，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合適之生存環境，期以達到降解 TPH 之目的。(3) 植生復育試驗施作：管理第一年栽植之白楊樹並播種太陽麻，以改善 TPH 與重金屬之污染。(4) 土樣採集與分析：採集土壤進行 TPH 與重金屬含量分析，藉以評析污染改善效益。(5) 植物生理調查與採樣分析：進行白楊樹與太陽麻之生育調查與白楊樹之生理試驗，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、植體分析與植物生理調查結果評析復育效益。

本年度之執行成果為：(1) 試驗區管理：每天上下午各一次，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，以保持土壤於適當含水量範圍。其次，每月皆視雜草與試驗生物之生長狀況聘僱工人加以清除，以維持場址之合適試驗環境。此外，已完成六次施肥及七次噴藥，所施肥料種類包括台塑地寶一號有機肥(全氮 4.6%、全磷酐 4.8%、全氧化鉀 3.2%、有機質 50%)與台肥 43 號化學肥料；而施藥主要之防治對象為斜紋夜盜、豆莢螟、小綠葉蟬、擬尺蠖、蚜蟲類、臺灣黃毒蛾及番茄斑潛蠅等常見之蟲害，以及白粉病、枯萎病及鏽病等常見之病害。(2) 生物復育試驗施作：本年度於執行期間在 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四次。施放之蚯蚓為紅蚯蚓(*Eisenia fetida*)，每一區塊約施放 5.4 公斤。石化分解菌種為 *Pseudomonas* sp. NKNU01，先在實驗室大量培養後，再載運至現場施灑，每一區塊約施灑 20 公升。(3) 植生復育試驗施作：本計畫依白楊樹生長所需之伸展空間及現場機具作業之需求，以間距約 2.5 m 於場地內栽種白楊樹，總計 350 顆。而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，太陽麻之播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，惟平均數約為每平方公尺 150 棵，其生長期約為 10 週。本年度除持續管理白楊樹外，並播植及收成三期太



陽麻。在白楊樹管理方面發現，自 101 年 12 月中旬起葉片開始轉黃並逐漸掉葉，至 1 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停頓，且無植體可供採集與分析。一直到 102 年 4 月中旬才陸續長出新葉，其後即快速生長。由於分蘗數多，故於 6 月與 9 月中採集枝葉進行植體重金屬分析，且加以修剪與秤重，供復育效益評析之用。至於太陽麻部分，本期已完成三期播種，且於收成前先於每試驗區隨機選取 25 棵做為生育調查及重金屬分析之用，收成後加以秤重，供復育效益評析之用。各次收成之太陽麻植體與修剪之白楊樹枝葉皆裝袋送至崁頂焚化爐進行焚化處理。

(4) 土樣採集與分析：本年度共進行六次土樣採集及 TPH 分析，二次重金屬分析。結果發現，經兩年度之復育後，各試驗區之 TPH 多有不同程度之降低，以各區之最高濃度而言，BP1 由 87,501 mg/kg 減至 43,185 mg/kg，BP2 由 14,878 mg/kg 降至土壤污染管制標準以下，PR1 由 51,721 mg/kg 減至 7,296 mg/kg，PR2 由 73,661 mg/kg 減至 56,757 mg/kg，僅 BP3 為例外，由 76,524 mg/kg 不減反增至 81,769 mg/kg。再就各試驗區之同一土層深度觀之，三個生物復育區之 TPH 濃度隨著時間雖仍有高低不規則之變化，但似乎呈現降低趨勢，除部分濃度不減反增之土層外，其餘土層之減量百分比介於 39%~100%，尤其濃度相對較低之 BP1 及 BP2 兩區，除 100 與 120 公分土層外，其他土層之改善效果較明顯，減量百分比可達 93%~100%，且部分土層之濃度已低於土壤污染管制標準。至於污染較高之 BP3 區則相對成效較差，且有半數土層之濃度仍高於土壤污染管制標準。其中 BP3-1-30、BP3-2-30、BP3-2-60 之濃度仍分別高達 81,769、51,805 及 37,645 mg/kg，其原因可能是高污染環境較不利於蚯蚓、分解菌與植物根系之活動，以致影響其降解效果。此外，多數淺層土壤(0~60 公分)之改善效果較深層土壤佳，可能是上述復育生物多在此範圍活動之故。至於植生復育區 (PR1 及 PR 2) TPH 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，有半數土層之濃度已降至土壤污染管制標準以下，但仍有半數土層高於土壤污染管制標準。再就兩年度三次重金屬之測值加以比較發現，主要污染重金屬 (Zn、Cr、Cu、Ni) 在各試驗區同一土層之濃度呈現不規則之變化趨勢，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改善效果十分有限。

(5) 植物生理調查與採樣分析：在所完成之兩次白楊樹生理調查結果中，無論淨光合作用率或葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益( $F_v/F_m$ )之測定結果皆指出，各區之淨光合作用率測值並無顯著差異，而所有植株之  $F_v/F_m$  測定值皆高於 0.75，顯示白楊樹在試驗地生長良好，均屬健康範圍，足證其對試驗場址之污染物確有良好之耐受力與適應力，為本場址合適之植生復育樹種。再就生

育調查結果論之，白楊樹第一年四次調查之成長率為 55~213%，其中以污染較嚴重之 BP3 區之成長較緩慢，而第二年之成長率高達 245~310%，顯見白楊樹確可適應污染物並快速生長，對污染改善確有正面效益。至於本期太陽麻之生育調查數據指出，無論是株高或乾濕重都以 CK 區最高，而本次之量測值皆小於第一年之值，部分可能是冬季之低溫與短日照氣候所致，部分則可能導因於白楊樹之遮蔭效果。而在五個處理區中，重金屬濃度最高之 PR1 及 PR2，其測值呈現較低之現象，可見污染物對兩種植物之發育或有抑制之可能，值得持續觀察。最後就植體分析結果觀之，白楊樹之重金屬分析結果指出，土壤中污染量最高之 Zn，在各試驗區植體中有明顯之吸收累積量，Ni 次之，再其次為 Cu 與 Cr。而第二次之鋅分析值明顯高於第一次，可能是生長期較長而有較多之吸收累積量，而其餘三者則差異不大。至於太陽麻兩年度之重金屬測值皆為根部之含量大於地上部。而各重金屬在植體中之吸收累積量亦以鋅最大，其餘三個主要污染元素 Cu、Cr、Ni 之含量差異不大，不過略呈  $Cu > Ni > Cr$  之現象。此外，比較各區植體中之含量顯示，CK 區之植體含量最低，此與其土壤中之最低含量一致。PR1 與 PR2 之含量較其他試區高，亦與其高重金屬濃度相符。不過，污染相對較嚴重的 BP3 卻無高重金屬累積量，是否因高污染而抑制根部之吸收有待持續觀察。總結言之，兩種植物皆可於試驗區中生存與生長，顯示兩者對於本場址之污染物皆有相當之耐受性與適應性，有益於後續之污染物改善試驗。

(6) 復育效益評析：由兩年之白楊樹與太陽麻生育調查，以及白楊樹光合潛力及葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益測定結果都顯示，污染區植物生長狀況良好，顯然可以忍受並適應污染場址之生長條件。其次，就生物復育成果而言，由將近一年之土壤 TPH 分析資料可知，三個生物復育區之 TPH 濃度隨著時間雖仍有高低不規則之變化，但似乎呈現降低趨勢，除部分濃度不減反增之土層外，其餘土層之減量百分比介於 39%~100%，尤其濃度相對較低之 BP1 及 BP2 兩區，改善效果亦較明顯，減量百分比可達 93%~100%，且部分土層之濃度已低於土壤污染管制標準。而污染較高之 BP3 區則相對成效較差，且有半數土層之濃度仍高於土壤污染管制標準。至於植生復育區（PR1 及 PR 2）TPH 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，已有半數土層之濃度已降至土壤污染管制標準以下，但仍有半數土層高於土壤污染管制標準。此外，兩種植體重金屬含量之測值都顯示，Zn、Cu、Ni、Cr 在污染區植體中皆有吸收累積現象，加以白楊樹生長快速，而太陽麻生長期短，故可藉由植體之修剪與移除而逐漸達到改善污染之目的。本年度將收成之太陽麻或修剪後之白楊樹枝葉經烘乾後秤重，且取部分進行植體重金屬含量

分析，再由其生質量（以乾重計）與植體重金屬濃度計算其吸收移除量。結果發現，太陽麻對重金屬之吸收移除量依序為 Zn (50.8 g) > Cu (1.735 g) > Ni (1.186 g) > Cr (0.331 g)；白楊樹對重金屬之吸收移除量依序為 Zn (33.2 g) > Ni (0.260 g) > Cu (0.188 g) > Cr (0.048 g)。將太陽麻與白楊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，分別為 Zn (84 g) > Cu (1.93 g) > Ni (1.45 g) > Cr (0.38 g)。此移除量若與五個試驗區推估之重金屬總含量 Zn 1084 kg、Cu 27.5 kg、Ni 21.0 kg、Cr 47.0 kg 相較，其移除比例仍低，未來雖可藉由增加太陽麻之播植次數與白楊樹之成長，大幅增加復育植物之生質量與重金屬移除量，惟整體而言，復育本場址之高重金屬污染土壤所需之期程甚長。以主要污染物重金屬鋅為例，由污染區白楊樹修剪與太陽麻拔除所移除之重金屬量(84 克/年)，與土壤中鋅之總推估量(1,084 公斤)相較，欲達整治目標，約需 12,905 年，惟白楊樹未來長大成熟後，其生質量估計可增加 60~100 倍，故可將復育時程縮短至約 100~200 年。

由本計畫之執行，除可達整治污染場址，逐步降低重金屬與石化污染物含量，為解除管制奠基外，同時藉公有地之整治行動，發揮政府整治污染場址之表率與宣示效果。就污染場址整治技術而言，將蚯蚓與分解菌之生物復育試驗成果應用於現場，可檢視兩者間之異同。藉由生理調查及植體分析，可比較試驗樹種之除污功能，做為其他污染場址引用植生復育之參考。同時將生物復育與植生復育結合，發揮相輔相成功效，未來或可成為較高效率之複合整治技術，提供我國土壤與地下水污染整治一個價廉、經濟、實用與有效的方法。不過，由於白楊樹屬外來樹種，且有長達五個月之落葉期，對污染物之移除效率可能降低或停止，故未來擬爭取本案延續執行，同時栽植構樹、苦楝、血桐、黃槿、青剛櫟與大葉楠等本土綠化樹種且分別評析其改善效果，並與白楊樹及太陽麻之結果比對，除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，並將優選植物做為未來本場址或其他相似污染場址植生復育之參考。

## 第一章、計畫緣起與目的

### 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 hydrocarbons, 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，乃屏東縣政府民政處所屬之殯葬預定地（圖 1-1）。

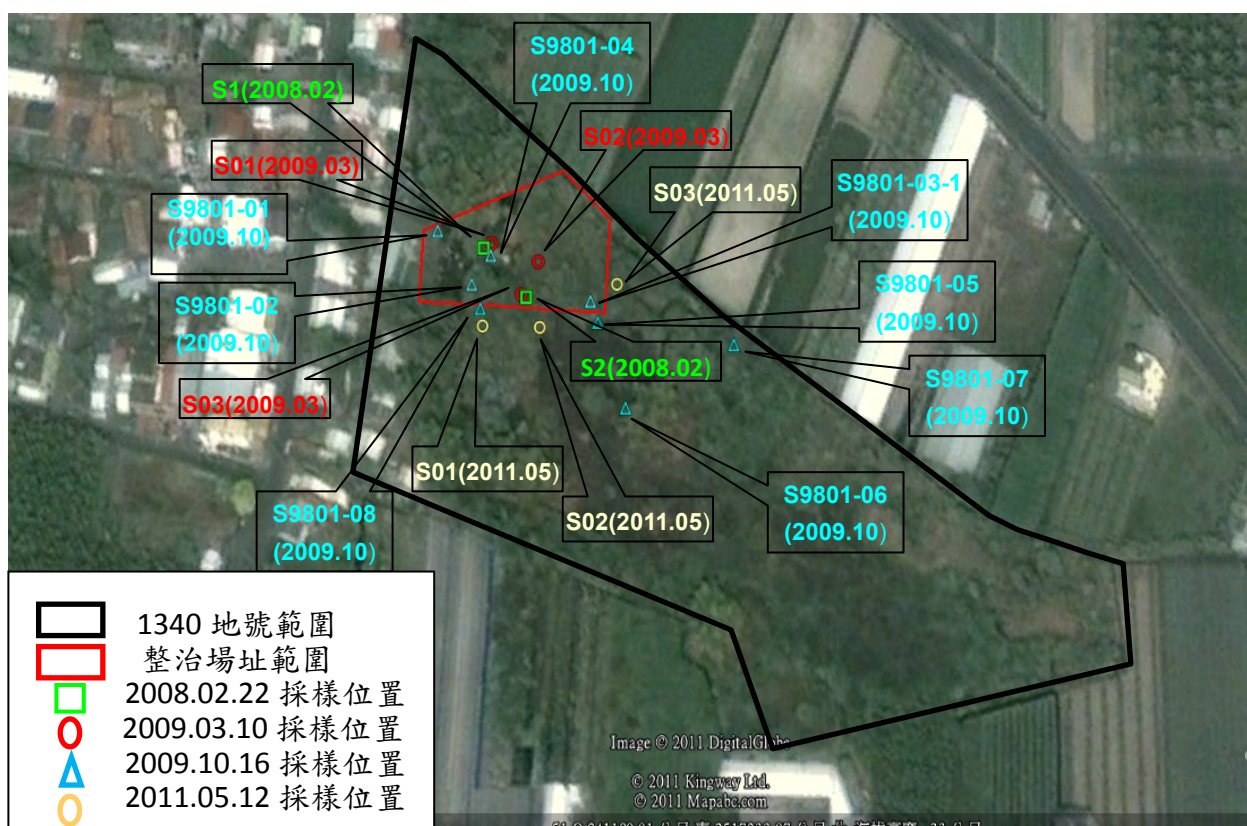


圖 1-1 計畫場址地理位置、範圍及歷次土壤採樣點分佈圖



## 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 加侖的鐵桶，且因無污染防治措施，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，以減輕污染影響且避免污染擴大。



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 <sub>g</sub>	TPH <sub>d</sub>	TPH
		mg/kg								
S1	0-15	295	<b><u>586</u></b>	<b><u>711</u></b>	<b><u>51800</u></b>	<b><u>555</u></b>	2.78	100	110000	<b><u>110000</u></b>
S2	0-5	41.0	88.0	129	<b><u>44200</u></b>	105	0.58	958	68100	<b><u>69100</u></b>
	5-20	41.4	42.7	47.6	1180	56.0	ND	43.0	27600	<b><u>27600</u></b>
	20-40	36.6	33.9	38.6	624	51.3	0.58	46.7	24400	<b><u>24400</u></b>
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 及表 1-3）發現重金屬（鉻、鋅）及 TPH 仍超過管制標準，因此即依法進行後續公告程序。

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	<b><u>282</u></b>	152	131	49.7	<b><u>8300</u></b>
S02	30-60	ND	78.8	47.6	77.6	26.8	<b><u>2750</u></b>
S03	30-60	ND	75.1	70.7	55.1	33.3	<b><u>2350</u></b>
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 <sub>g</sub>	805
		TPH <sub>d</sub>	<b>123000</b>
S02	30-50	TPH <sub>g</sub>	173
		TPH <sub>d</sub>	<b>59900</b>
	110-130	TPH <sub>g</sub>	<10
		TPH <sub>d</sub>	<b>1530</b>
S03	30-50	TPH <sub>g</sub>	<10
		TPH <sub>d</sub>	<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以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 1-2，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、S9801-03-01 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 1,800 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	<b>4600</b>
	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	<b>9250</b>
S9801-04	0-15	23.5	0.106	0.69	<b>566</b>	361	<b>288</b>	76.7	<b>18100</b>
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 <sub>g</sub>	TPH <sub>d</sub>	TPH
		mg/kg		
S9801-01	130-150	<10	<50	--
S9801-02	180-200	<10	<b>25700</b>	<b>25700</b>
	230-250	<10	144	144
S9801-03-01	130-150	350	<b>48200</b>	<b>48550</b>
S9801-04	80-100	112	<b>16500</b>	<b>16612</b>
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 1,800 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 <sub>g</sub>	ND<1.73	ND<1.73	ND<1.73	-	1000
TPH <sub>d</sub>	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：

- 1、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。
- 2、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。
- 3、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 1-6）顯示，地下水中之重金屬含量甚微，然而表 1-7 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。
- 4、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(陳士賢等，2008)。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，有助於降低土壤之 PAH 濃度，亦即可提高 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，故本年度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。

- 5、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 (phyto-decontamination)、植生穩定 (phyto-stabilization)、植生萃取 (phyto-extraction) 與植生分解 (phyto-degradation) 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，亦搭配白楊樹與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。
- 6、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，表層土壤較易提供適合之氧氣、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 1.2 公尺，故本計畫同時進行深根系之白楊樹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：

- 1、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合適之生存環境，使發揮污染物降解效果。
- 2、生物復育試驗施作：持續進行蚯蚓與分解菌之施放與繁殖，使發揮污染整治效用。
- 3、植生復育試驗施作：持續進行白楊樹管理與太陽麻之播植與收成，使發揮污染整治效用。
- 4、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。
- 5、植物生理調查與採樣分析：除對白楊樹與太陽麻進行生育調查外，亦進行白楊樹生理試驗，同時採集兩者之植體樣品分析其重金屬含量，並據以評析污染改善效益。
- 6、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效益。



## 1.4 執行經費與期程

本研究之執行經費為二百萬元整；預期完成之工作項目與進度則如下圖所示：

表 1-9 計畫工作項目與執行期程甘特圖

年月 工作項目	2012 12	2013 1	2013 2	2013 3	2013 4	2013 5	2013 6	2013 7	2013 8	2013 9	2013 10	2013 11	備 註
試驗區除草													
紅蚯蚓培育與施放													
石化分解菌接種													
土壤採樣與 TPH 分析													
生物復育成效評析													
白楊樹培育管理													
白楊樹生育調查													
白楊樹生理試驗													
太陽麻播種與收成													
植體採樣與分析													
植生復育成效評析													
第一次工作進度報告			◎										
期中報告						◎							
第三次工作進度報告								◎					
期末報告												◎	
工作進度估計百分比 (%，累積數)	15	20	26	33	44	49	59	64	75	82	92	100	
預定查核點	第 1 季:		完成第一季試驗區除草、紅蚯蚓培育與施放、石化分解菌接種、土壤採樣與 TPH 分析、白楊樹培育管理(澆水、施肥、噴藥)、白楊樹生育調查、太陽麻播種與收成；白楊樹生理試驗執行中。										
	期中:		完成期中報告										
	第 3 季:		完成第三季試驗區除草、紅蚯蚓培育與施放、石化分解菌接種、土壤採樣與 TPH 分析、白楊樹培育管理(澆水、施肥、噴藥)、白楊樹生育調查、白楊樹生理試驗、太陽麻播種與收成。										
	期末:		完成期末報告										
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。													

## 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。計畫之主要目的與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、計畫背景

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 之降解會有明顯促進效果，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。以下將針對本計畫所使用之生物復育與植生復育法分別概述之。

### 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)，直接於污染場址添加對污染物有分解能力的微生物。後者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)；第三類為降解 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*, *Mesophilicum*, *Rhodococcus*, *Graphium*, *Alcaligenes*, *Xanthobacter*, *Xanothomas*, *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Hydrogenophaga*, *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, 2000；Fiorenza and Rifai, 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(Cavalca et 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)，故須維持整治場址的氧化環境。

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」(陳士賢，2009)，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」（陳士賢，2011），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。在此二計畫之批次實驗中，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)。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 Eijssackers 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%以上之 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，但蚯蚓的存在與運動行為，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。

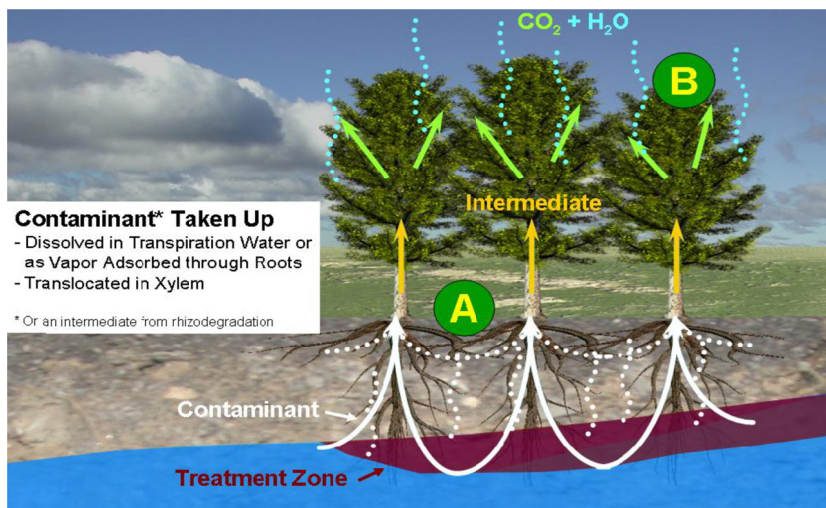
如上所述，植生復育法係藉由種植植物以獲得改善污染之效益，比較其他方法，所需之設備、人力及其他資源較少，而植栽也同時具有綠美化效果，亦即植生復育乃結合並利用陽光、植物及微生物之特性，執行成本低廉，且兼顧自然景觀與污染整治，故為綠色整治概念之污染整治技術。此法之特性包括以下項目：

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. 植株的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)。

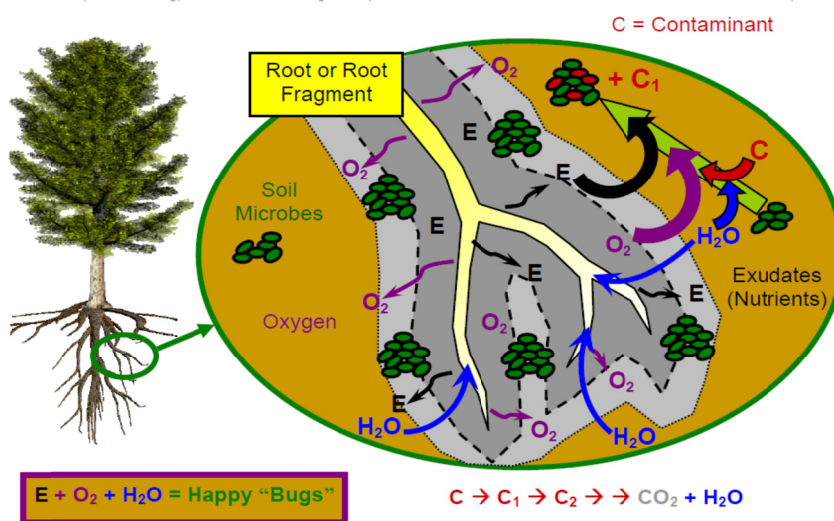




參考及引用資料來源：ITRC(2009)

圖2-2 植物分解作用-A為植物酵素作用，B為光合作用

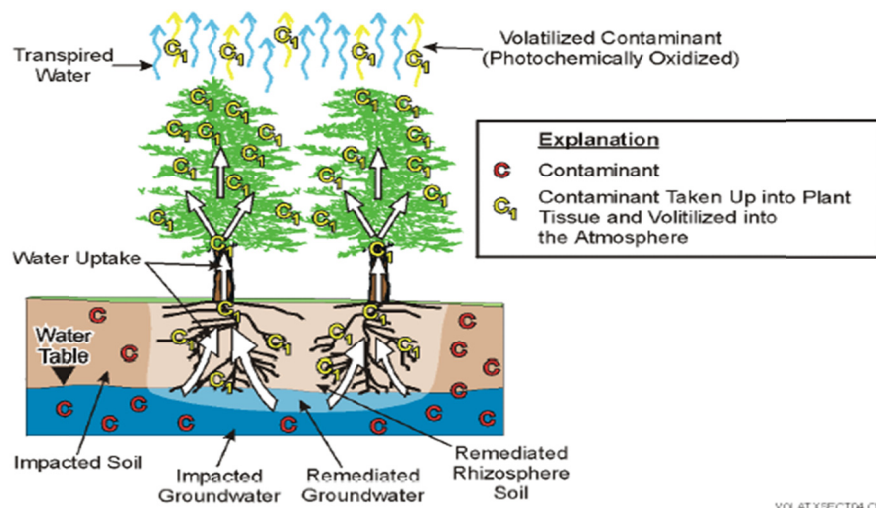
2. 根圈土壤分解作用(Rhizodegradation)：在植物根圈部位與微生物相互作用，分解土壤中污染物，如圖2-3所示。



參考及引用資料來源：ITRC(2009)

圖2-3 根系土壤分解

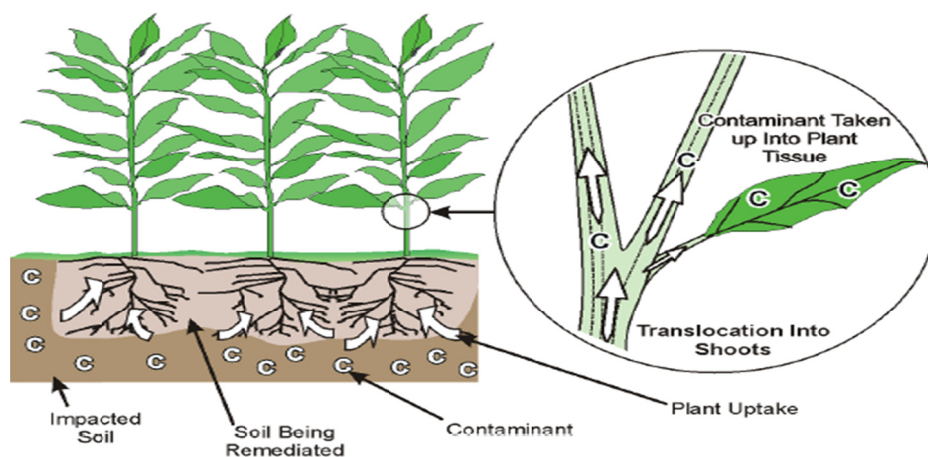
3. 植物揮發作用(Phytovolatilization)：植物自土壤中吸收污染物進入體內後，隨植物呼吸作用，經由葉片排入大氣之中(圖2-4)。



參考及引用資料來源：ITRC(2009)

圖2-4 植物揮發作用

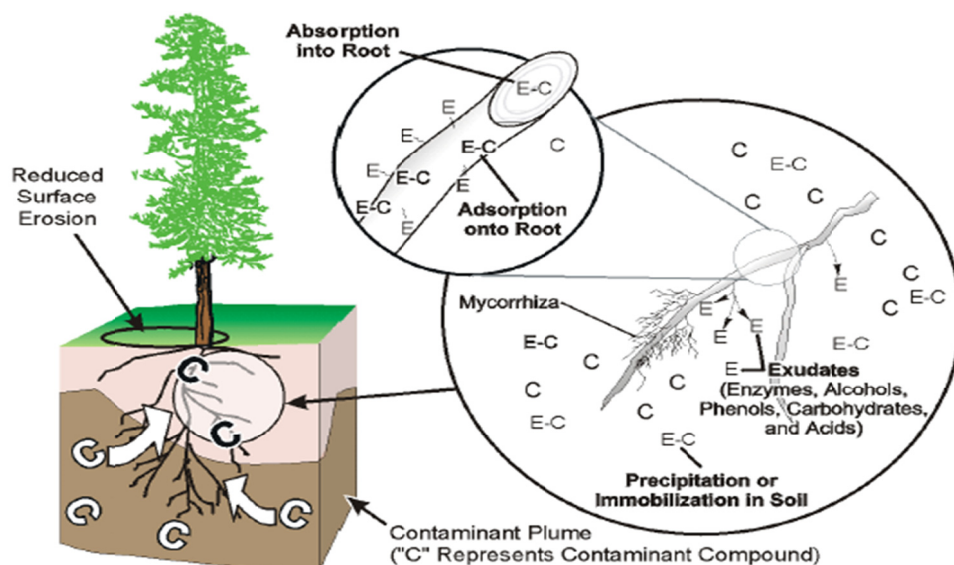
4. 植生萃取作用(Phytoextraction)：植物自土壤中將金屬等污染物吸收並傳送至植體各部分組織儲存(圖2-5)。部分植物具有重金屬超量累積特性，可在植物葉片上將Ni、Co、Cu、Cr、濃縮至0.1%。某些化學藥劑可促進重金屬的移動性、植物有效性及累積濃度增加，藉以縮短植生萃取所需之時間(圖2-5)。



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，國內已有諸多研究，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，2005a；賴鴻裕、陳尊賢，2005b)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；林浩潭等，2005；賴鴻裕、盧至人，2007)。

本計畫執行兩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樹與淺根系太陽麻，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。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。

## 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，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。



### 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。

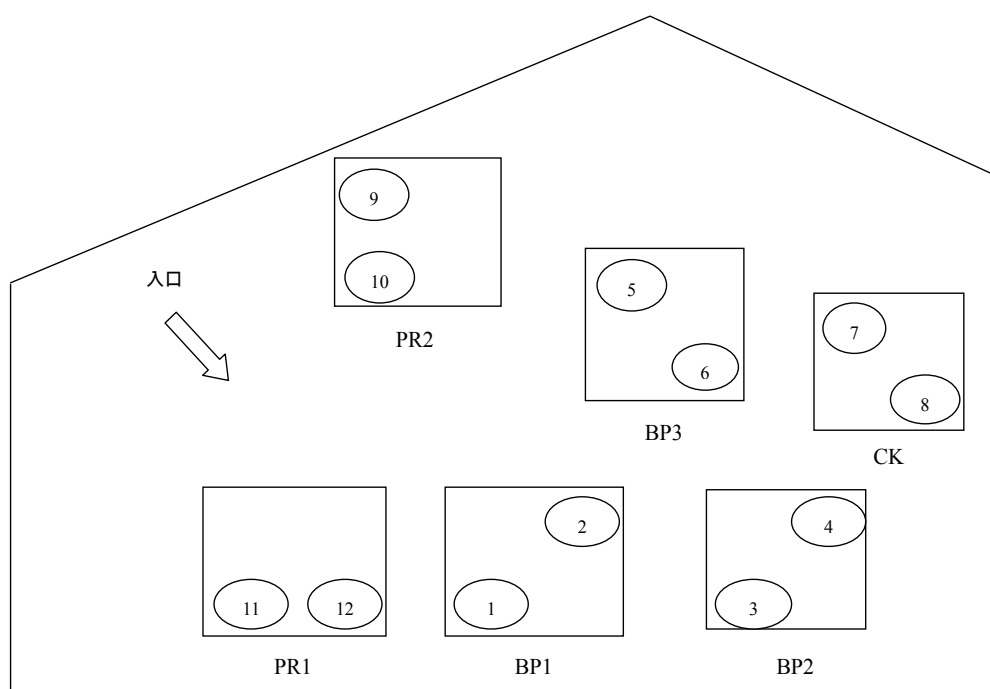


圖 3-1 試驗區與土壤採樣點配置圖



## 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，且聘僱工讀生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工人加以清除。

### 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，一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* 為歐洲常用進行土壤污染物檢測之物種，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，用途則多作為魚餌之用，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。每一區塊施放數量約為 5.4 公斤，施放時並以米糠拌入土壤中，以提供蚯蚓較佳生長環境。

#### 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。而在土壤中分離出具有 MTBE 分解潛力之菌種，已公開寄存於新竹食品工業發展研究所之生物資源保存及研究中心，本計畫第一年已使用過，本年度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 10min (4400rpm)，倒去上清液。
- 1ml PBS(phosphate buffer solution) 回溶洗菌塊放於 2c.c. 離心管，再離心 10 分鐘(4400rpm)。
- 重複上述過程 3 次。
- 用 1 c.c. 培養液回溶菌塊。

(3). 使用分光光度計測菌量：利用 OD<sub>600</sub> 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

19-20L 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。

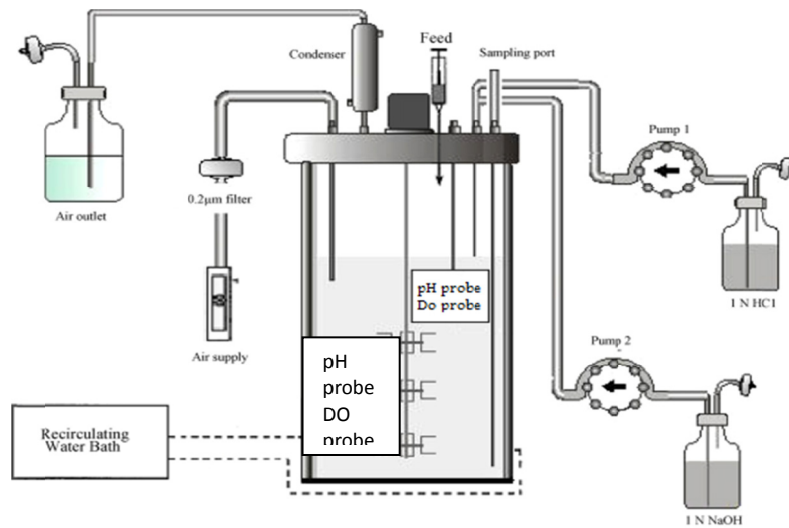


圖 3-3 生物反應槽-攪拌式生物反應槽 (Stirred Tank Bioreactor)

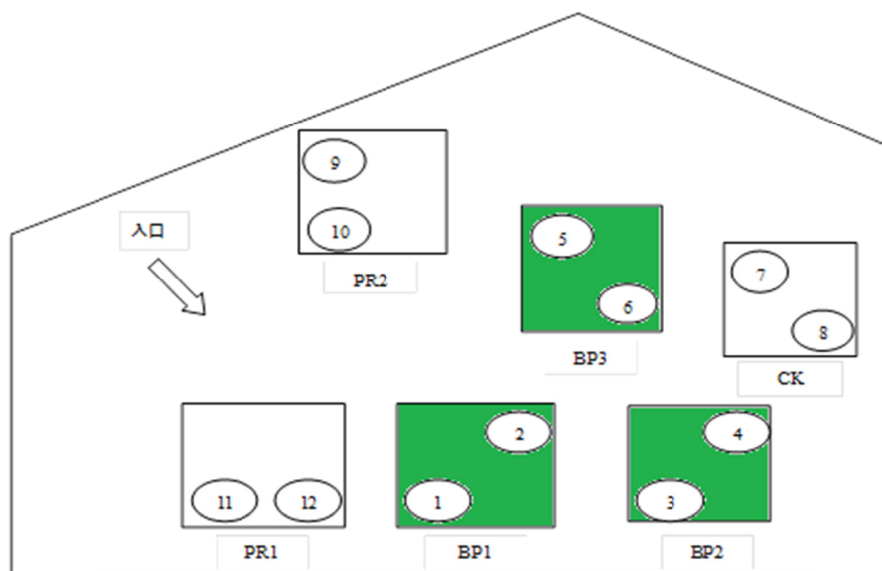


圖 3-4 石化分解菌施灑區塊(綠色區塊 BP1、BP2 及 BP3)

### 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），選取白楊樹（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。第一年栽種後之生長情形與污染改善皆有正面效果，本年度將持續進行試驗與效益評析。



圖 3-5 白楊樹(左)及太陽麻(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，雖然國外資料顯示，白楊樹為優良之復育樹種，但在國內仍無應用前例。本計畫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。其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。

本計畫依白楊樹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 於場地內栽種白楊樹，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，惟平均數約為每平方公尺 150 棵。



### 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，即 101 年 5 月 22 日起每間隔約 60 日採集一次，迄今總計採集九次。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)。每次採集之土樣皆進行 TPH 濃度檢測，其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。至於重金屬則因性質穩定而不易於短期內產生大幅濃度變化，故本年度僅對第二與第五次土樣進行檢測。其分析亦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。

### 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，本計畫所種植之白楊樹及太陽麻，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

由於白楊樹為多年生木本植物，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，本計畫執行期間共計進行四次；而太陽麻則因屬短期生長之草本植物，生長期約為 8~10 週，故而係於收成時於每試驗區隨機選取 25 棵量測其株高與重量（濕重與乾重），共計執行三次。

## 二、生理調查

本項目係對白楊樹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，計畫執行期間共進行二次。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 4 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  $\text{CO}_2$  濃度控制在  $400 \mu\text{l L}^{-1}$ ，相對濕度 60~80%，葉溫控制在  $28^\circ\text{C}$ 。在此等固定條件下所得到的淨光合作用率數據，可比較白楊樹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( $F_o$ )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  $F_v = F_m - F_o$ )。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

白楊樹於期中與期末（六月與九月中）採集枝葉，每株採集 3~5 枝，各試驗區混合為一樣品，亦即每次採集 6 個樣品，計畫執行期間共有 12 個樣品。而太陽麻則於收成後，於每試驗區隨機選取 25 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，總計 12 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

本計畫對白楊樹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。

### 3.8 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，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。

## 3.9 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試驗區，PR1 與 PR2 則為進行植生復育之試驗區。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樹並栽植太陽麻，以達改善 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：進行白楊樹與太陽麻之生理調查，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、植體分析與植物生理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，本年度執行情況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

本試驗聘僱兩位工讀生輪值，每天上下午各一次，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 為採集土樣後於實驗室內所測得之各試驗區土壤水分含量，約可維持於 20% 之含水量。

#### 二、除草

由於本場址之氣候與環境條件極易蔓生雜草，故本計畫每月皆視雜草與試驗植物之生長狀況聘僱工人加以清除，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，本年度於 2 月 5 日進行第一次施肥，主要對象為太陽麻，白楊樹因處於落葉狀態而未施用。其後自四月中旬起，白楊樹陸續長出新葉並迅速成長，故而分別於 5 月 3 日、6 月 18 日、7 月 24 日、9 月 3 日與 10 月 4 日進行追施。肥料種類包括台塑地寶一號有機肥(全氮 4.6%、全磷 4.8%、全氧化鉀 3.2%、有機質 50%)與台肥 43 號化學肥料，兩者以間隔施用為原則，以充分供應植物與分解生物之養分。表 4-2 為採集土樣後於實驗室內所測得之各試驗區土壤之有機質含量，表中數據顯示，由於有機肥之施用與含 TPH 之故，故各區之含量較一般耕作土壤高出許多。此外，由於白楊樹易感染鏽病，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、蚜蟲類、臺灣黃毒蛾及番茄斑潛蠅等；常見之病害則有白粉病及枯萎病。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 12 月 11 及 25 日、2 月 5 日、3 月 26、6 月 28 日、9 月 29 日、10 月 5 日進行七次噴藥。

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	23.7	BP2-1-30	18.0	BP3-1-30	24.8
BP1-1-60	29.8	BP2-1-60	17.5	BP3-1-60	26.8
BP1-1-100	37.1	BP2-1-100	14.0	BP3-1-100	19.9
BP1-1-120	39.0	BP2-1-120	18.1	BP3-1-120	15.1
BP1-2-30	23.3	BP2-2-30	19.5	BP3-2-30	27.8
BP1-2-60	24.4	BP2-2-60	19.6	BP3-2-60	27.7
BP1-2-100	40.1	BP2-2-100	28.5	BP3-2-100	16.7
BP1-2-120	23.5	BP2-2-120	40.5	BP3-2-120	17.5
編號	含水率(%)	編號	含水率(%)	編號	含水率(%)
PR1-1-30	36.5	PR2-1-30	19.9	CK-1-30	13.0
PR1-1-60	37.5	PR2-1-60	19.2	CK-1-60	14.2
PR1-2-30	30.0	PR2-1-100	21.1	CK-1-100	14.0
PR1-2-60	28.8	PR2-1-120	19.5	CK-1-120	16.7
		PR2-2-30	40.9	CK-2-30	23.3
		PR2-2-60	41.5	CK-2-60	19.9
		PR2-2-100	18.6	CK-2-100	19.3
		PR2-2-120	14.1	CK-2-120	16.7



表 4-2 各試驗區土壤有機質含量

編號	有機質(%)	編號	有機質(%)	編號	有機質(%)
BP1-1-30	8.9	BP2-1-30	5.7	BP3-1-30	11.0
BP1-1-60	13.2	BP2-1-60	5.5	BP3-1-60	8.9
BP1-1-100	24.4	BP2-1-100	3.2	BP3-1-100	4.6
BP1-1-120	20.5	BP2-1-120	3.5	BP3-1-120	4.1
BP1-2-30	7.5	BP2-2-30	4.0	BP3-2-30	8.9
BP1-2-60	7.8	BP2-2-60	4.1	BP3-2-60	9.7
BP1-2-100	24.5	BP2-2-100	8.4	BP3-2-100	4.2
BP1-2-120	8.0	BP2-2-120	15.6	BP3-2-120	4.7
編號	有機質(%)	編號	有機質(%)	編號	有機質(%)
PR1-1-30	14.7	PR2-1-30	5.9	CK-1-30	1.6
PR1-1-60	17.8	PR2-1-60	3.2	CK-1-60	2.7
PR1-2-30	10.4	PR2-1-100	3.9	CK-1-100	2.6
PR1-2-60	10.1	PR2-1-120	5.6	CK-1-120	7.9
		PR2-2-30	13.9	CK-2-30	3.6
		PR2-2-60	20.5	CK-2-60	3.0
		PR2-2-100	3.7	CK-2-100	2.3
		PR2-2-120	3.6	CK-2-120	2.6

## 4.2 生物復育試驗施作

本試驗預定於執行期間在 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三次。其中蚯蚓已於 2 月 4 日、6 月 5 日、10 月 2 日施放，且於 4 月 2 日、6 月 4 日、8 月 2 日施灑分解菌。每一區塊施放蚯蚓之數量約為 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，於 10 月 27 日進行計量調查(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，其數量介於 2~153 隻，平均約為每平方公尺 350 隻，顯示施放之蚯蚓生長狀況良好。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。



圖 4-1 生物復育區植入蚯蚓(上)及計量調查(下)作業

### 4.3 植生復育試驗施作

本計畫第一年已於試驗場址中栽種 350 棵白楊樹。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，平均每平方公尺約有 150 棵，生長期約為 8~10 週。本年度持續管理白楊樹並定期播植及收成太陽麻。

在白楊樹管理方面發現，自 101 年 12 月中旬起葉片開始轉黃並逐漸掉葉，至 1 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停頓，且無植體可供採集與分析。一直到 102 年 4 月中旬才陸續長出新葉，其後即快速生長，全期之生長狀況如圖 4-2 所示。由於分櫟數多，故於 6 月與 9 月中採集枝葉進行植體重金屬分析，且加以修剪與秤重，供復育效益評析之用。

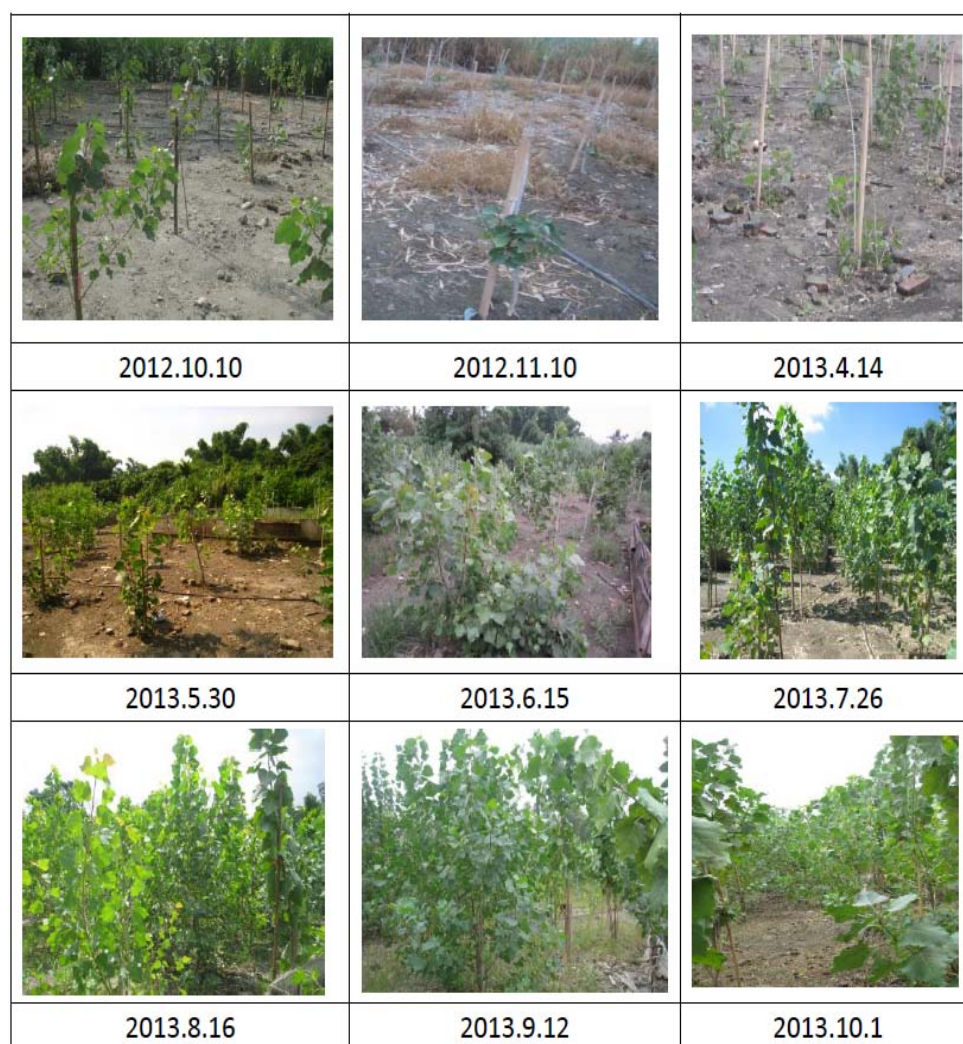


圖 4-2 白楊樹全期之生長狀況



至於太陽麻部分，本期已分別於 1 月 26 日、4 月 2 日與 7 月 27 日完成三期播種。以第一期種植之太陽麻為例，其生長情形如圖 4-3 所示，各次收成之成熟植體與修剪之白楊樹枝葉皆裝袋送至崁頂焚化爐進行焚化處理(圖 4-4)。於收成前先於每試驗區隨機選取 25 棵做為生育調查及重金屬分析之用。

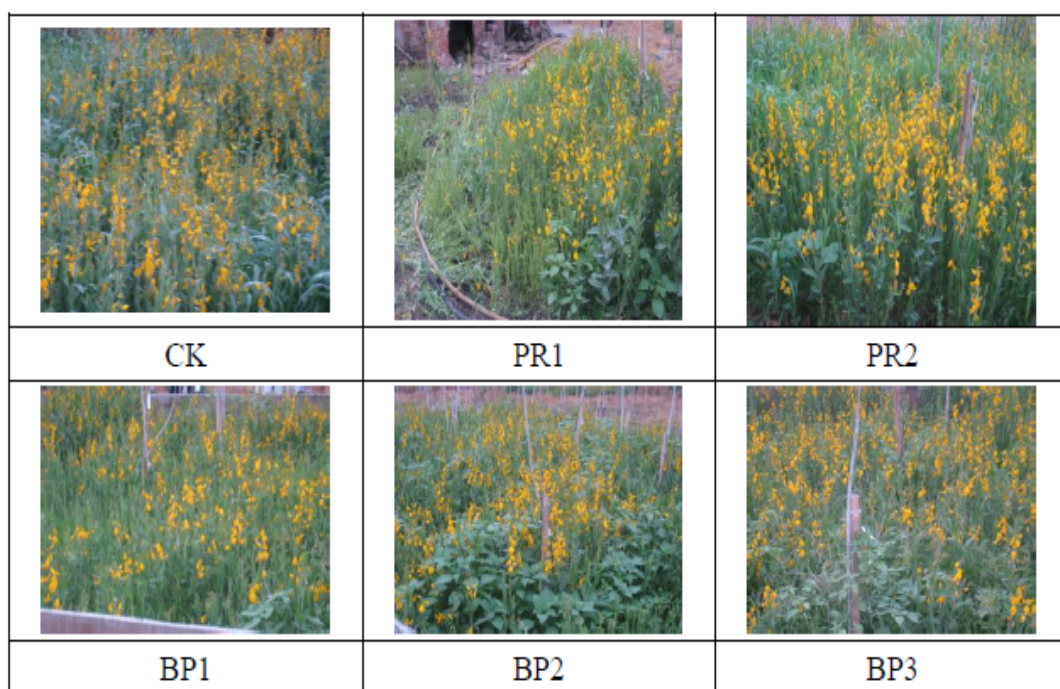


圖 4-3 太陽麻之生長情形



圖 4-4 太陽麻之拔除與裝袋作業

## 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，已分別於 12 月 12 日、2 月 4 日、4 月 2 日、6 月 4 日、8 月 1 日與 10 月 2 日執行六次土壤採樣，各次土樣皆進行 TPH 分析，而第二與第五次樣品則同時檢測重金屬（Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni）。其結果如下：

### 一、土壤 TPH 分析結果

本計畫第一年執行初始階段（2011 年底）分別自三個生物復育區（BP1、BP2、BP3）各採集三個表土樣品分析 TPH 濃度，做為背景參考值，檢測值列於表 4-3。由表中數據可知，三樣區之 TPH 濃度皆超過土壤污染管制標準，其範圍分別為 BP1 區 45076~71978 mg/kg、BP2 區 3887~9670 mg/kg 及 BP3 區 5881~166708 mg/kg，顯示 BP3 區之濃度最高且變異最大，BP2 則較低。

表4-3 試驗初期各樣區表土中總石油碳氫化合物測值

樣區	編號	1	2	3
	分析方法	NIEA S703.61B		
	濃度單位	mg/kg		
BP1		<b><u><math>7.20 \times 10^4</math></u></b>	<b><u><math>4.89 \times 10^4</math></u></b>	<b><u><math>4.51 \times 10^4</math></u></b>
BP2		<b><u><math>9.67 \times 10^3</math></u></b>	<b><u><math>3.89 \times 10^3</math></u></b>	<b><u><math>4.28 \times 10^3</math></u></b>
BP3		<b><u><math>5.59 \times 10^3</math></u></b>	<b><u><math>1.10 \times 10^5</math></u></b>	<b><u><math>1.67 \times 10^5</math></u></b>
偵測極限(MDL)		15		
土壤污染管制標準		1000		

註：測值為粗黑字體且下標線者係超過土壤污染管制標準

第一年經移除地上廢棄物與整地後，於 2012 年 5 月 15 日開始執行生物復育，其後自 5 月 22 日起每間隔約 60 日採集一次土壤樣品分析總石油碳氫化合物含量，迄今總計採集九次，其分析結果列於表 4-4。表中所列之數據為第一次採樣與本年度六次採樣之測值，其中生物復育區（BP1、BP2、BP3）之第一次採樣時間為生物處理後七天（101 年 5 月 22 日），而植生復育區（PR1、PR2）則為生物處理後三個月（101 年 8 月 13 日）。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。由分析結果可發現各樣區之 TPH 不僅累積於表層，

其深度可達 120 公分以上。而經兩年度之復育後，各試驗區之 TPH 多有不同程度之降低，以各區之最高濃度而言，BP1 由 87501 mg/kg 減至 43185 mg/kg，BP2 由 14878 mg/kg 降至土壤污染管制標準以下，PR1 由 51721 mg/kg 減至 7296 mg/kg，PR2 由 73661 mg/kg 減至 56757 mg/kg，僅 BP3 為例外，由 76524 mg/kg 不減反增至 81769 mg/kg。再就各試驗區之同一土層深度觀之(表 4-4 及圖 4-5～圖 4-9)，三個生物復育區之 TPH 濃度隨著時間雖仍有高低不規則之變化，但似乎呈現降低趨勢，除部分濃度不減反增之土層外，其餘土層之減量百分比介於 39%～100%，尤其濃度相對較低之 BP1 及 BP2 兩區，除 100 與 120 公分土層外，其他土層之改善效果較明顯(圖 4-5 及圖 4-6)，減量百分比可達 93%～100%，且部分土層之濃度已低於土壤污染管制標準。至於污染較高之 BP3 區則相對成效較差，且有半數土層之濃度仍高於土壤污染管制標準。其中 BP3-1-30、BP3-2-30、BP3-2-60 之濃度仍分別高達 81769、51805 及 37645 mg/kg，其原因可能是高污染環境較不利於蚯蚓、分解菌與植物根系之活動，以致影響其降解效果。此外，多數淺層土壤(0～60 公分)之改善效果較深層土壤佳，可能是上述復育生物多在此範圍活動之故。至於植生復育區 (PR1 及 PR 2) TPH 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，且有半數土層之濃度已降至土壤污染管制標準以下，但仍有半數土層高於土壤污染管制標準。

綜上所述，在一年餘的整治過程中，植生與生物兩種復育方法似乎對 TPH 都有相當程度的改善效果，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，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 (heterogeneous) 物質，雖然在同一採樣點進行多次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，未來仍有出現之可能，其長期改善效果仍待持續試驗與驗證。

表 4-4 各生物復育區土壤總石油碳氫化合物監測結果

採樣時間 (生物處理後)	7 日 5/22/101	7 個月 12/12/102	9 個月 2/4/102	11 個月 4/2/102	13 個月 6/4/102	15 個月 8/1/102	17 個月 10/2/102	減量 百分比
分析方法	NIEA S703.61B							
濃度單位	mg/kg							%
BP1-1-30	<b>69074</b>	<b>1510</b>	974	324	<b>4923</b>	<b>18361</b>	426	99
BP1-1-60	<b>60939</b>	<b>2618</b>	<b>3171</b>	925	<b>2320</b>	<b>19936</b>	822	98
BP1-1-100	<b>42009</b>	<b>30280</b>	730	<b>60002</b>	<b>27099</b>	<b>11493</b>	<b>43185</b>	+2
BP1-1-120	---	---	<b>26539</b>	<b>48952</b>	<b>37328</b>	<b>23685</b>	<b>35421</b>	+33
BP1-2-30	<b>46026</b>	212	210	95	<b>2526</b>	458	<b>1713</b>	96
BP1-2-60	<b>23952</b>	26	859	36	<b>1009</b>	<b>5868</b>	834	96
BP1-2-100	<b>51159</b>	<b>18680</b>	<b>129571</b>	<b>1327</b>	<b>3191</b>	322	<b>3443</b>	93
BP1-2-120	---	---	<b>87501</b>	<b>95635</b>	98	567	<b>1419</b>	98
BP2-1-30	<b>10673</b>	480	60	ND	ND	<b>4178</b>	46	99
BP2-1-60	<b>3512</b>	46	101	ND	ND	674	ND	100
BP2-1-100	<15	78	<b>19488</b>	39	173	ND	ND	100
BP2-1-120	---	---	<b>20568</b>	<b>1726</b>	153	ND	ND	100
BP2-2-30	<b>10380</b>	315.94	351.49	ND	713	442	83	99
BP2-2-60	764	ND	543	728	<b>1078</b>	384	ND	100
BP2-2-100	<b>14878</b>	<b>3579</b>	<b>1658</b>	<b>3312</b>	ND	101	583	96
BP2-2-120	---	---	<b>25992</b>	<b>3956</b>	ND	180	ND	100
BP3-1-30	<b>76524</b>	<b>82542</b>	<b>69831</b>	<b>13620</b>	<b>30949</b>	<b>73560</b>	<b>81769</b>	+6
BP3-1-60	<b>15102</b>	<b>118805</b>	<b>33683</b>	<b>42425</b>	<b>21802</b>	<b>7109</b>	692	99
BP3-1-100	<b>16937</b>	<b>88566</b>	<b>31083</b>	<b>33696</b>	<b>25622</b>	<b>2337</b>	ND	100
BP3-1-120	---	---	<b>11819</b>	<b>16693</b>	<b>10553</b>	274	ND	100
BP3-2-30	<b>16779</b>	<b>1535</b>	<b>3638</b>	<b>8825</b>	<b>10942</b>	<b>2861</b>	<b>51805</b>	+208
BP3-2-60	<b>11193</b>	<b>6584</b>	<b>4487</b>	<b>4731</b>	<b>7353</b>	<b>15644</b>	<b>37645</b>	+236
BP3-2-100	<b>7421</b>	<b>2302</b>	<b>4702</b>	<b>3579</b>	<b>10622</b>	<b>15458</b>	<b>4504</b>	39
BP3-2-120	---	316	352	ND	713	442	83	99
偵測極限	15							
土污管制標準	1000							

註: 1.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(%) = [(最後一次測值 - 第一次測值) / 第一次測值] \* 100

4.※表無污染或改善期程太短而未計算減量百分比；正值表濃度不減反增



表 4-4(續)

採樣時間 (生物處理後)	3 個月 8/13/101	7 個月 12/12/102	9 個月 2/4/102	11 個月 4/2/102	13 個月 6/4/102	15 個月 8/1/102	17 個月 10/2/102	減量 百分比
分析方法	NIEA S703.61B							
濃度單位	mg/kg							%
PR1-1-30	<b><u>28260</u></b>	<b><u>7183</u></b>	<b><u>20712</u></b>	<b><u>12890</u></b>	<b><u>21125</u></b>	<b><u>7192</u></b>	ND	100
PR1-1-60	<b><u>9756</u></b>	<b><u>11904</u></b>	---	<b><u>3723</u></b>	<b><u>65334</u></b>	<b><u>16173</u></b>	ND	100
PR1-2-30	<b><u>17291</u></b>	<b><u>4628</u></b>	<b><u>3746</u></b>	<b><u>4383</u></b>	<b><u>1879</u></b>	<b><u>3231</u></b>	<b><u>6970</u></b>	59
PR1-2-60	<b><u>51721</u></b>	525	<b><u>2154</u></b>	<b><u>1773</u></b>	<b><u>3114</u></b>	<b><u>37578</u></b>	<b><u>7296</u></b>	85
PR2-1-30	<b><u>42520</u></b>	<b><u>1178</u></b>	<b><u>1289</u></b>	<b><u>2318</u></b>	<b><u>2365</u></b>	963	<b><u>2536</u></b>	94
PR2-1-60	<b><u>73661</u></b>	<b><u>9600</u></b>	<b><u>14292</u></b>	<b><u>3262</u></b>	<b><u>1435</u></b>	<b><u>26539</u></b>	ND	100
PR2-1-100	<b><u>34555</u></b>	442	37	<b><u>1964</u></b>	ND	<b><u>12043</u></b>	ND	100
PR2-1-120	-	-	<b><u>2110</u></b>	<b><u>2279</u></b>	584	<b><u>3218</u></b>	ND	100
PR2-2-30	<b><u>65827</u></b>	<b><u>45699</u></b>	<b><u>24809</u></b>	<b><u>30648</u></b>	<b><u>2581</u></b>	<b><u>6816</u></b>	280	99
PR2-2-60	<b><u>23476</u></b>	<b><u>11602</u></b>	<b><u>73247</u></b>	<b><u>63331</u></b>	<b><u>103898</u></b>	<b><u>8482</u></b>	<b><u>56757</u></b>	+141
PR2-2-100	<b><u>73661</u></b>	<b><u>3921</u></b>	14	224	<b><u>11606</u></b>	205	<b><u>4261</u></b>	94
PR2-2-120	---	---	<b><u>3500</u></b>	<b><u>1119</u></b>	<b><u>4712</u></b>	656	<b><u>3212</u></b>	8
CK-1-30	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-1-60	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-1-100	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-1-120	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-2-30	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-2-60	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-2-100	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
CK-2-120	---	ND	ND	ND	ND	ND	ND	※
偵測極限	15							
土污管制標準	1000							

註: 1.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(%) = [(最後一次測值 - 第一次測值) / 第一次測值] \* 100

4.※表無污染或改善期程太短而未計算減量百分比；正值表濃度不減反增

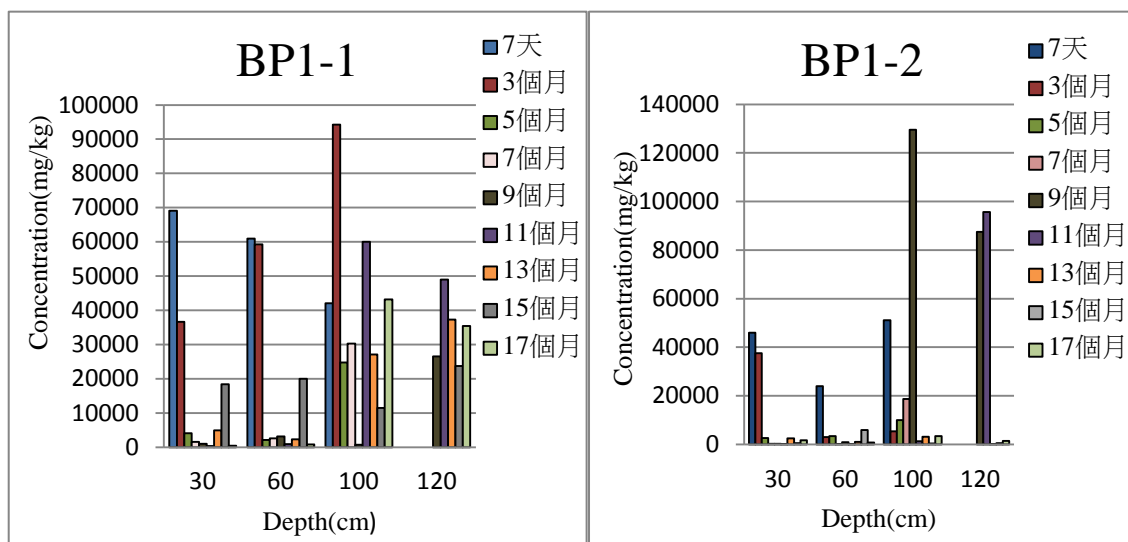


圖 4-5 生物復育樣區 BP1 之 TPH 濃度變化

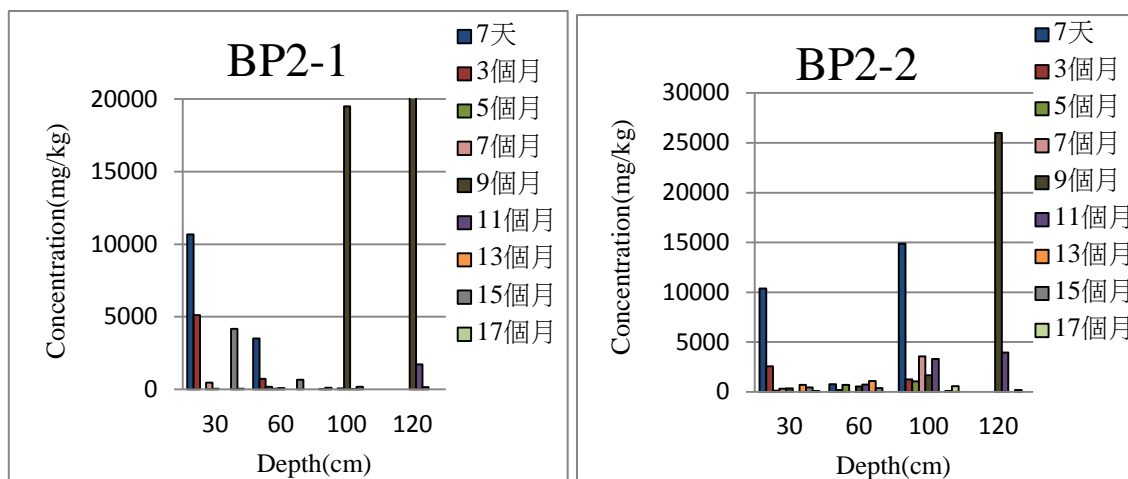


圖 4-6 生物復育樣區 BP2 之 TPH 濃度變化

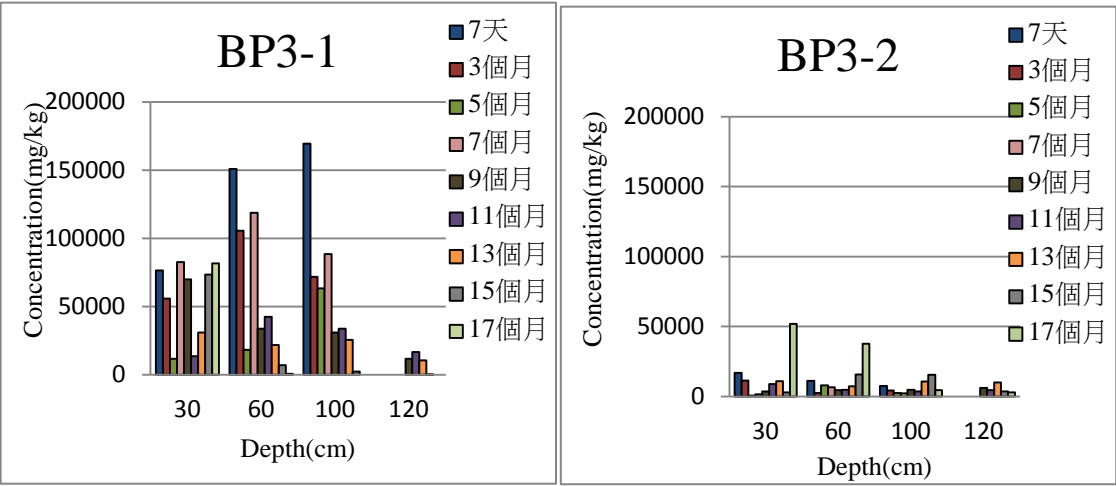


圖 4-7 生物復育樣區 BP3 之 TPH 濃度變化

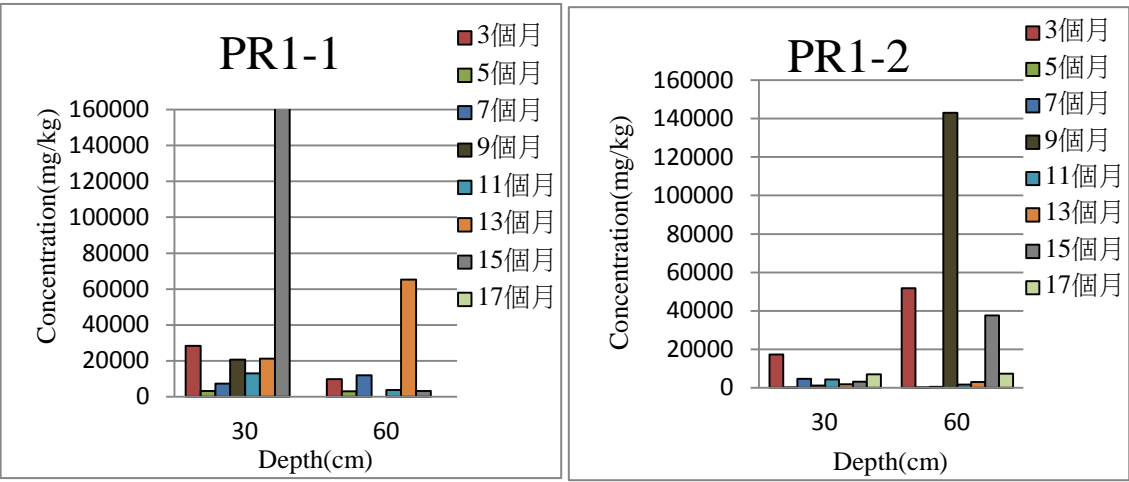


圖 4-8 植生復育樣區 PR1 之 TPH 濃度變化

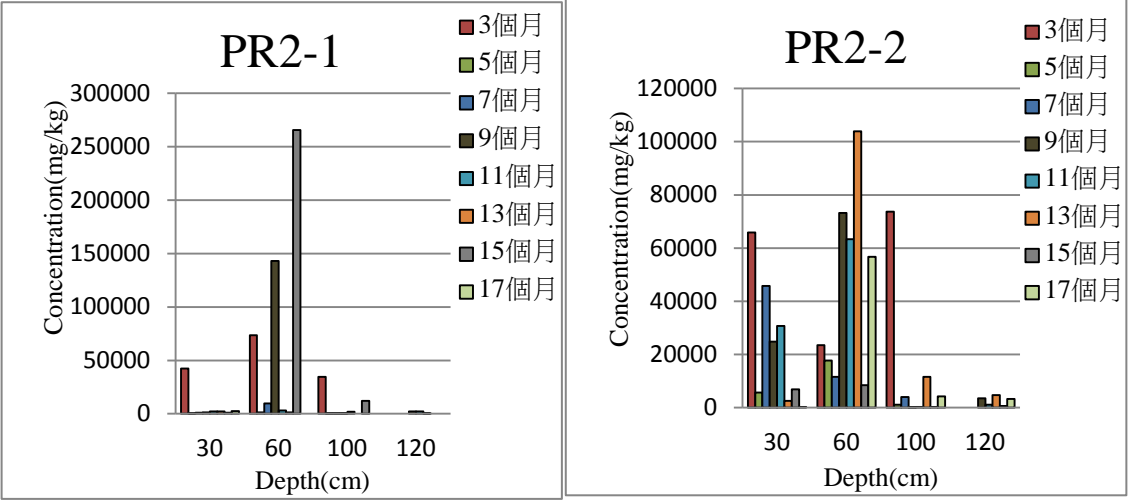


圖 4-9 植生復育樣區 PR2 之 TPH 濃度變化

## 二、土壤重金屬分析結果

本計畫第一年執行伊始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 4-5，可做為場址土壤重金屬之背景參考值。由於第一年之場址廢棄物清除與整地費時甚久，復因重金屬性質穩定而不易於短期內產生大幅濃度變化，故執行期間未再進行本項分析。本年度已於 2 月 4 日與 8 月 1 日各採集一次土樣進行檢測，此二次（即第二與第三次）土樣之重金屬檢測結果分別列於表 4-6 與表 4-7。由各元素三次之測值可知，本場址五個處理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 4-3、表 4-4 與表 4-5～表 4-7 之測值發現，在生物復育區兩種污染物之濃度多呈現 BP3 > BP1 > BP2 之趨勢，而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 4-5～表 4-7 中同一採樣點各重金屬之三次分析值，可藉以評估兩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）在各採樣點之三次分析值加以平均並彙整於表 4-8，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改善效果十分有限，此論點可由 4.6 節之復育效益評析加以證實。而重金屬之三次分析值呈現不規則變化之現象，應該是土壤之非均質性所致。

表 4-5 第一次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><b>2.91×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>330</b></u>	<u><b>478</b></u>	<u><b>476</b></u>
BP1-1-60	138	<u><b>3.62×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>476</b></u>	<u><b>780</b></u>	<u><b>1030</b></u>
BP1-1-100	139	<u><b>4.12×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>535</b></u>	<u><b>953</b></u>	<u><b>1293</b></u>
BP1-2-30	76.6	<u><b>1.70×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>283</b></u>	<u><b>612</b></u>	<u><b>406</b></u>
BP1-2-60	93.3	<u><b>4.59×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>576</b></u>	<u><b>990</b></u>	<u><b>1133</b></u>
BP1-2-100	87.9	<u><b>4.49×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>506</b></u>	<u><b>943</b></u>	<u><b>940</b></u>
BP2-1-30	45.2	<u><b>5.67×10<sup>3</sup></b></u>	N.D.	105	158	175
BP2-1-60	72.7	<u><b>6.15×10<sup>3</sup></b></u>	N.D.	103	151	225
BP2-1-100	65.0	<u><b>6.81×10<sup>3</sup></b></u>	N.D.	114	173	209
BP2-2-30	47.1	<u><b>8.81×10<sup>3</sup></b></u>	N.D.	153	<u><b>301</b></u>	175
BP2-2-60	127	<u><b>3.56×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>396</b></u>	<u><b>714</b></u>	<u><b>538</b></u>
BP2-2-100	137	<u><b>3.92×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>462</b></u>	<u><b>788</b></u>	<u><b>604</b></u>
BP3-1-30	78.1	<u><b>3.01×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>433</b></u>	<u><b>1016</b></u>	<u><b>582</b></u>
BP3-1-60	92.0	<u><b>2.93×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>426</b></u>	<u><b>1076</b></u>	<u><b>546</b></u>
BP3-1-100	94.1	<u><b>3.12×10<sup>4</sup></b></u>	N.D.	<u><b>477</b></u>	<u><b>1206</b></u>	<u><b>580</b></u>
BP3-2-30	52.0	<u><b>8.10×10<sup>3</sup></b></u>	N.D.	<u><b>367</b></u>	<u><b>528</b></u>	233
BP3-2-60	55.6	<u><b>9.78×10<sup>3</sup></b></u>	N.D.	<u><b>311</b></u>	<u><b>674</b></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 4-5 (續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
PR1-1-30	169	<b><u>5.60×10<sup>4</sup></u></b>	N.D.	<b><u>1206</u></b>	<b><u>4361</u></b>	<b><u>1236</u></b>
PR1-1-60	86.9	<b><u>4.66×10<sup>4</sup></u></b>	N.D.	<b><u>947</u></b>	<b><u>3928</u></b>	<b><u>1120</u></b>
PR1-1-100	59.2	<b><u>1.31×10<sup>4</sup></u></b>	N.D.	<b><u>209</u></b>	<b><u>550</u></b>	380
PR1-2-30	42.1	<b><u>7.26×10<sup>3</sup></u></b>	N.D.	130	246	238
PR2-1-30	51.8	<b><u>1.13×10<sup>4</sup></u></b>	N.D.	195	<b><u>655</u></b>	234
PR2-1-60	49.6	<b><u>9.10×10<sup>3</sup></u></b>	N.D.	141	<b><u>306</u></b>	186
PR2-1-100	28.4	1347	N.D.	117	56.2	44.5
PR2-2-30	90.9	<b><u>4.23×10<sup>4</sup></u></b>	1.50	<b><u>528</u></b>	<b><u>853</u></b>	<b><u>1393</u></b>
PR2-2-60	53.5	<b><u>1.76×10<sup>4</sup></u></b>	0.367	<b><u>206</u></b>	<b><u>423</u></b>	<b><u>616</u></b>
PR2-2-100	39.6	<b><u>3.90×10<sup>3</sup></u></b>	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 4-6 第二次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>2.21×10<sup>4</sup></u>	1.64	<u>302</u>	<u>666</u>	<u>442</u>
BP1-1-60	133	<u>2.45×10<sup>4</sup></u>	1.73	<u>405</u>	<u>1930</u>	<u>578</u>
BP1-1-100	59.7	<u>1.61×10<sup>4</sup></u>	1.31	176	<u>239</u>	291
BP1-1-120	75.8	<u>2.66×10<sup>4</sup></u>	1.83	<u>308</u>	<u>438</u>	337
BP1-2-30	83.6	<u>2.0×10<sup>4</sup></u>	1.73	<u>304</u>	<u>811</u>	<u>420</u>
BP1-2-60	77.2	<u>1.97×10<sup>4</sup></u>	1.21	<u>298</u>	<u>726</u>	<u>411</u>
BP1-2-100	129	<u>4.16×10<sup>4</sup></u>	2.08	<u>591</u>	<u>1130</u>	<u>1080</u>
BP1-2-120	129	<u>4.02×10<sup>4</sup></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>1.06×10<sup>4</sup></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>3.95×10<sup>4</sup></u>	2.19	<u>615</u>	<u>1560</u>	<u>938</u>
BP2-2-120	439	<u>4.03×10<sup>4</sup></u>	2.39	<u>534</u>	221	<u>780</u>
BP3-1-30	89.3	<u>5.22×10<sup>4</sup></u>	3.34	<u>722</u>	<u>1430</u>	<u>1240</u>
BP3-1-60	89.2	<u>1.74×10<sup>4</sup></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>2.73×10<sup>4</sup></u>	2.37	<u>756</u>	<u>7120</u>	<u>895</u>
BP3-2-60	112	<u>1.82×10<sup>4</sup></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(續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
PR1-1-30	125	<u><b>1.23×10<sup>5</sup></b></u>	2.41	<u><b>974</b></u>	<u><b>914</b></u>	<u><b>1630</b></u>
PR1-2-30	201	<u><b>4.34×10<sup>4</sup></b></u>	2.17	<u><b>611</b></u>	<u><b>899</b></u>	<u><b>904</b></u>
PR1-2-60	55.6	<u><b>6100</b></u>	0.98	112	<u><b>608</b></u>	240
PR2-1-30	74.6	<u><b>3.71×10<sup>4</sup></b></u>	2.39	<u><b>509</b></u>	<u><b>1020</b></u>	<u><b>1500</b></u>
PR2-1-60	81.7	<u><b>4.89×10<sup>4</sup></b></u>	3.02	<u><b>595</b></u>	<u><b>605</b></u>	<u><b>2460</b></u>
PR2-1-100	38.8	<u><b>3200</b></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><b>3.30×10<sup>4</sup></b></u>	2.72	<u><b>626</b></u>	<u><b>3540</b></u>	<u><b>798</b></u>
PR2-2-60	159	<u><b>3.92×10<sup>4</sup></b></u>	2.37	<u><b>632</b></u>	<u><b>4050</b></u>	<u><b>818</b></u>
PR2-2-100	63.2	<u><b>1.80×10<sup>4</sup></b></u>	1.20	<u><b>214</b></u>	<u><b>539</b></u>	290
PR2-2-120	46.4	<u><b>5700</b></u>	0.88	128	<u><b>278</b></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 4-7 第三次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><b>2.88×10<sup>4</sup></b></u>	0.90	<u><b>347</b></u>	<u><b>493</b></u>	<u><b>508</b></u>
BP1-1-60	73.4	<u><b>2.05×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>218</b></u>	<u><b>321</b></u>	<u><b>325</b></u>
BP1-1-100	78.6	<u><b>3.84×10<sup>4</sup></b></u>	0.77	<u><b>368</b></u>	<u><b>520</b></u>	537
BP1-1-120	88.3	<u><b>2.79×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>341</b></u>	<u><b>571</b></u>	522
BP1-2-30	50.8	<u><b>7330</b></u>	N.D	139	<u><b>262</b></u>	<u><b>202</b></u>
BP1-2-60	50.5	<u><b>1.69×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>209</b></u>	<u><b>441</b></u>	<u><b>331</b></u>
BP1-2-100	57.4	<u><b>1.18×10<sup>4</sup></b></u>	N.D	<u><b>213</b></u>	<u><b>400</b></u>	<u><b>287</b></u>
BP1-2-120	69.0	<u><b>2.11×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>3287</b></u>	<u><b>615</b></u>	<u><b>438</b></u>
BP2-1-30	61.7	<u><b>1.24×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>211</b></u>	<u><b>457</b></u>	<u><b>295</b></u>
BP2-1-60	60.9	<u><b>1.99×10<sup>4</sup></b></u>	N.D	<u><b>245</b></u>	<u><b>566</b></u>	420
BP2-1-100	54.3	<u><b>9060</b></u>	N.D	183	<u><b>319</b></u>	239
BP2-1-120	60.7	<u><b>1.92×10<sup>4</sup></b></u>	N.D	<u><b>219</b></u>	<u><b>719</b></u>	348
BP2-2-30	29.2	<u><b>3820</b></u>	N.D	90.6	145	95.8
BP2-2-60	38.8	<u><b>8520</b></u>	N.D	<u><b>234</b></u>	<u><b>529</b></u>	212
BP2-2-100	35.7	<u><b>9290</b></u>	N.D	166	<u><b>337</b></u>	<u><b>181</b></u>
BP2-2-120	23.8	1430	N.D	62.1	74.9	<u><b>55.1</b></u>
BP3-1-30	72.1	<u><b>6.42×10<sup>4</sup></b></u>	2.29	1250	<u><b>2150</b></u>	<u><b>1010</b></u>
BP3-1-60	33.0	<u><b>2.67×10<sup>4</sup></b></u>	0.89	360	<u><b>674</b></u>	<u><b>355</b></u>
BP3-1-100	25.2	<u><b>6060</b></u>	N.D	130	182	117
BP3-1-120	21.3	<u><b>2980</b></u>	N.D	79.8	104	67.1
BP3-2-30	56.0	<u><b>1.87×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>368</b></u>	<u><b>1030</b></u>	<u><b>439</b></u>
BP3-2-60	77.3	<u><b>2.52×10<sup>4</sup></b></u>	0.77	<u><b>493</b></u>	<u><b>2060</b></u>	<u><b>560</b></u>
BP3-2-100	63.4	<u><b>2.26×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>455</b></u>	<u><b>1350</b></u>	482
BP3-2-120	45.4	<u><b>1.01×10<sup>4</sup></b></u>	N.D	<u><b>208</b></u>	<u><b>455</b></u>	218
土壤管制標準	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 4-7 (續)

編號	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Cu
	(mg/kg)					
PR1-1-30	155	<u><b>5.73×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>884</b></u>	<u><b>931</b></u>	<u><b>997</b></u>
PR1-1-60	65.3	<u><b>4.84×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>975</b></u>	<u><b>3150</b></u>	<u><b>1240</b></u>
PR1-2-30	87.2	<u><b>4.58×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>592</b></u>	<u><b>1250</b></u>	<u><b>898</b></u>
PR1-2-60	62.5	<u><b>2.55×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>339</b></u>	<u><b>650</b></u>	<u><b>551</b></u>
PR2-1-30	60.9	<u><b>2.5×10<sup>4</sup></b></u>	2.27	<u><b>467</b></u>	<u><b>2340</b></u>	<u><b>653</b></u>
PR2-1-60	71.8	<u><b>5.31×10<sup>4</sup></b></u>	0.77	<u><b>1240</b></u>	<u><b>2230</b></u>	<u><b>1560</b></u>
PR2-1-100	44.2	<u><b>2.11×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>319</b></u>	<u><b>498</b></u>	<u><b>457</b></u>
PR2-1-120	25.3	<u><b>5150</b></u>	N.D	125	191	144
PR2-2-30	89.9	<u><b>2.62×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	<u><b>393</b></u>	<u><b>1800</b></u>	<u><b>638</b></u>
PR2-2-60	58.6	<u><b>1.06×10<sup>4</sup></b></u>	<0.67	187	<u><b>429</b></u>	286
PR2-2-100	32.0	<u><b>2590</b></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 4-8 各試驗區三次土壤重金屬濃度平均值變化趨勢

重金屬 實驗區	Zn (mg/kg)			Cr (mg/kg)		
	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
BP1	35717	26350	21591	793	890	453
BP2	58700	13799	10452	381	362	393
BP3	45008	15468	22068	760	1596	1001
PR1	47075	57267	38500	2271	807	1495
PR2	29750	23330	18084	413	1268	956
管制標準	2000			250		
重金屬 實驗區	Cu (mg/kg)			Ni (mg/kg)		
	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
BP1	880	592	394	451	374	640
BP2	321	377	231	222	245	176
BP3	372	482	406	341	366	418
PR1	744	925	922	623	566	698
PR2	434	786	486	211	356	358
管制標準	400			200		



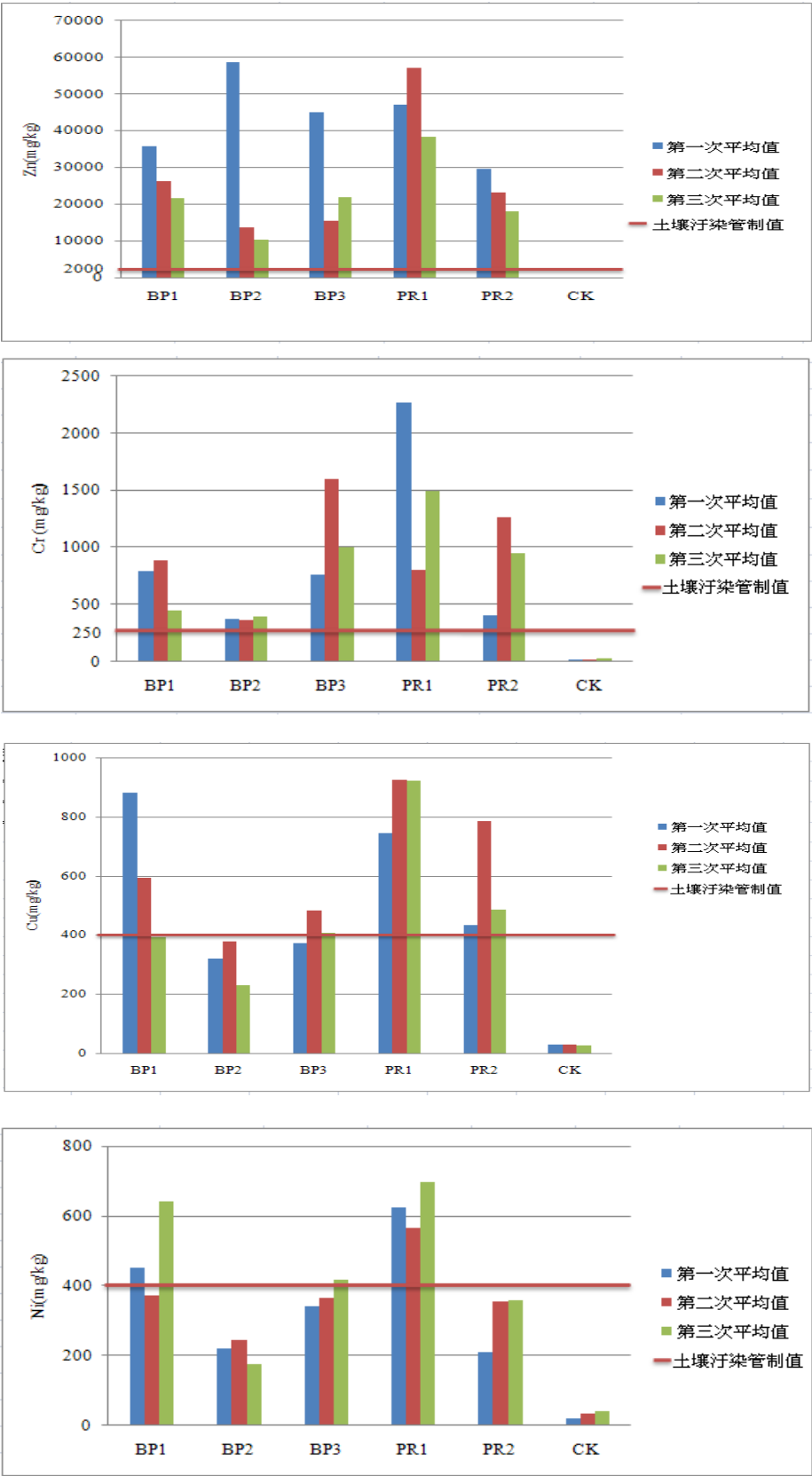


圖 4-10 各試驗區三次土壤重金屬濃度平均值變化趨勢

## 4.5 植物生理調查與採樣分析

### 一、白楊樹與太陽麻生育調查成果

本場址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 4-9，而生長狀況則如圖 4-2 所示。前四次係於栽植一個月後每 30~45 天調查一次，而如前所述，自 101 年 12 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，此期間呈現休眠狀態，故本年度第一次（即表中之第五次）調查乃於 4 月 30 日進行，其後並於 6 月 4 日、7 月 9 日與 8 月 16 日繼續執行，總計調查四次。由於最後一次調查時之平均樹高已達 252~318 公分，部分更超過四公尺，在本年七至九月之四次颱風期間皆造成倒伏損傷狀況，為防範颱風災損，且兼顧復育效益評析對生質量之需求，故後續之生育調查遂由株高改為修剪枝葉後之重量統計，且已執行兩次。風災倒伏植株與枝葉修剪作業如圖 4.11 所示。

表 4-9 白楊樹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：1.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

2.第一~四次為第一年調查結果，第五~八次則為第二年調查結果。



圖 4.11 風災倒伏植株與枝葉修剪作業

由表中資料可知，第一次調查時之高度介於 62~75 公分，各區差異不大，而對照區之平均高度為各區量測值之中數。第二次調查時，對照區之高度明顯高於其他各區，顯然對照區以外各區之白楊樹仍在適應土壤中之污染物，故發育略為遲緩。第三次及第四次之結果則顯示，BP1 及 BP2 兩區之高度已後來居上甚至大於 CK 區，顯然已逐漸適應污染物。而重金屬與 TPH 濃度最高之 BP3，白楊樹生長情況亦較差。表中資料亦指出，第一年四次調查之成長率達 55~213%，其中亦以高污染區 BP3 較低，整體而言，第一年發現白楊樹確為生長快速之植物，加以其對污染物之吸收累積效果，對改善污染效益具有相當正面效果。

至於本年度第一次（即第五次）調查結果發現，BP1、BP3 與 PR1 之值與第四次結果相當，顯見落葉期間白楊樹確實呈現休眠狀態，生長幾乎停頓。至於另三區之量測值不增反減之現象，乃因部分植株因病蟲害死亡後補植較為矮小之苗

木所致。如上所述，落葉情形一直到 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 16 日為止，四個月之成長率高達 245~310%，顯見白楊樹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。

至於本期太陽麻之生長狀況與收成後之植株照片分別如圖 4-3 與圖 4-12 所示，而其生育調查數據則列於表 4-10。表中數據指出，無論是株高或乾濕重都以 CK 區最高，而本年度之量測值皆小於第一年之值，其中第一次可能是栽種期適逢冬季之低溫與短日照氣候所致，其他兩次則可能導因於白楊樹之遮陰效果。

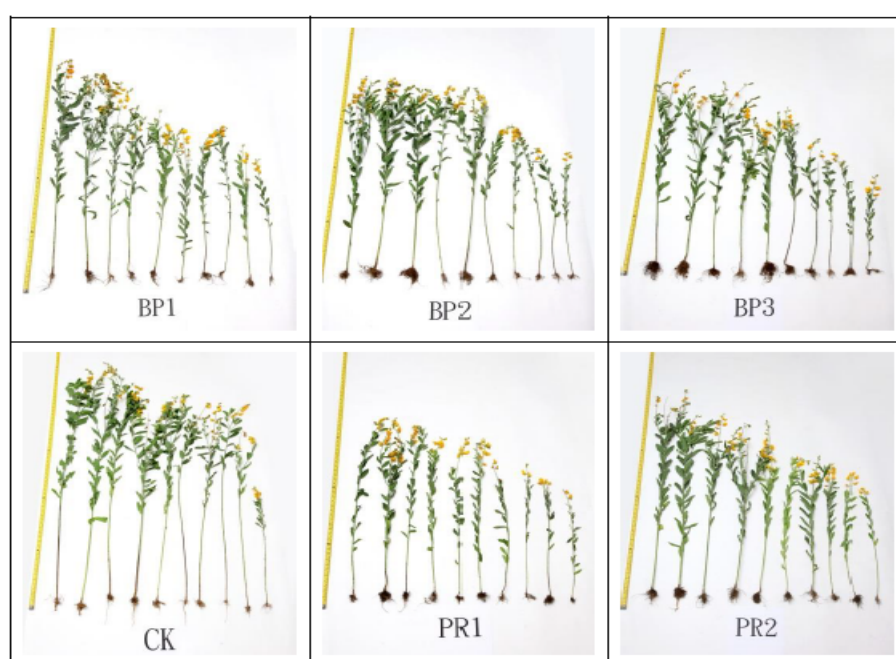


圖 4-12 試驗區太陽麻生長狀況

表 4-10 太陽麻生育調查結果

編號	株高(cm)			乾重(g)		
	第一期	第二期	第三期	第一期	第二期	第三期
CK	122	80	78	3.6	2.7	2.8
BP1	81	51	55	2.7	1.8	2.0
BP2	98	63	67	3.7	2.6	2.6
BP3	84	53	57	3.2	2.1	2.3
PR1	68	41	44	1.5	1.1	1.3
PR2	88	65	67	3.3	2.6	2.3

註：表中各值為 10 顆植株之平均值

## 二、白楊樹光合潛力測定結果

表 4-11 與表 4-12 乃白楊樹兩次淨光合作用率之測定結果，表中測值指出，除第一次之 BP2 有兩棵之測值略低外，其餘各顆之測值皆相當，而平均值亦然，各區測值並無顯著差異。由對照區與處理區植物相似之淨光合作用率觀之，白楊樹確實具有污染耐受能力。

表 4-13 與表 4-14 為試驗區白楊樹兩次葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益 ( $F_v/F_m$ ) 之測定結果。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，可做為植物是否遭受逆境之指標，供評估其健康狀態之用。對健康的植株而言，此  $F_v/F_m$  數值幾乎是個常數且高於 0.75，但遭到傷害的植物，此數值會降低，若低於 0.725 則屬顯著受害之情況 (Critchley 1998)。由表中數據可看出，第一次之葉綠素螢光  $F_v/F_m$  值雖出現 BP3 顯著高於 BP1 之現象，但所有植株之  $F_v/F_m$  值皆高於 0.75，至於第二次之測值則皆無顯著差異，且  $F_v/F_m$  值皆在 0.762 以上，兩次生理調查結果皆顯示白楊樹在試驗地生長良好，亦即均屬健康範圍。由於光合作用為植物之重要生理作用，而葉綠素又為光合作用之生化工廠，淨光合作用率及  $F_v/F_m$  兩項測值都顯示白楊樹之生理作用正常，且處理區與對照區亦無顯著差異，足證其對試驗場址之污染物確有良好之耐受力與適應力，為本場址合適之植生復育樹種。

表 4-11 第一次白楊樹淨光合作用率測定結果

重覆	淨光合作用率( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	PR2
1	26.8	29.2	28.1	27.8	31.0	23.7
2	27.7	28.1	28.1	27.1	27.7	21.6
3	28.2	28.2	27.8	32.2	27.4	26.1
4	29.6	29.2	29.9	33.1	27.5	23.3
mean $\pm$ SE	28.1 $\pm$ 0.6 <sup>a*</sup>	28.7 $\pm$ 0.3 <sup>a</sup>	28.5 $\pm$ 0.5 <sup>a</sup>	30.1 $\pm$ 1.5 <sup>a</sup>	28.4 $\pm$ 0.9 <sup>a</sup>	23.7 $\pm$ 0.9 <sup>b</sup>

\*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異( $p < 0.05$ )。



表 4-12 第二次白楊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
1	27.9	23.3	24.8	23.1	21.5	18.7
2	20.2	22.5	24.2	27.5	24.0	24.0
3	23.5	23.8	24.8	21.6	24.5	22.8
4	26.5	24.1	25.0	22.4	22.5	22.0
mean $\pm$ SE	24.5 $\pm$ 1.7 <sup>a*</sup>	23.4 $\pm$ 0.3 <sup>a</sup>	24.7 $\pm$ 0.2 <sup>a</sup>	23.6 $\pm$ 1.3 <sup>a</sup>	23.1 $\pm$ 0.7 <sup>a</sup>	21.8 $\pm$ 1.1 <sup>a</sup>

\*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異( $p < 0.05$ )。

表 4-13 第一次白楊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 Fv/Fm 值					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	BR2
1	0.799	0.787	0.810	0.785	0.774	0.811
2	0.792	0.763	0.769	0.822	0.800	0.793
3	0.771	0.768	0.780	0.798	0.784	0.792
4	0.797	0.785	0.785	0.817	0.791	0.786
mean $\pm$ SE	0.790 $\pm$ 0.006 <sup>ab*</sup>	0.775 $\pm$ 0.006 <sup>b</sup>	0.786 $\pm$ 0.009 <sup>ab</sup>	0.805 $\pm$ 0.009 <sup>a</sup>	0.787 $\pm$ 0.006 <sup>ab</sup>	0.795 $\pm$ 0.005 <sup>ab</sup>

\*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異( $p < 0.05$ )。

表 4-14 第二次白楊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 Fv/Fm 值					
	CK	BP1	BP2	BP3	PR1	BR2
1	0.824	0.771	0.795	0.811	0.774	0.790
2	0.787	0.762	0.754	0.821	0.777	0.783
3	0.802	0.764	0.792	0.788	0.765	0.773
4	0.777	0.813	0.807	0.779	0.790	0.771
mean $\pm$ SE	0.797 $\pm$ 0.010 <sup>a*</sup>	0.777 $\pm$ 0.012 <sup>a</sup>	0.787 $\pm$ 0.012 <sup>a</sup>	0.799 $\pm$ 0.010 <sup>a</sup>	0.776 $\pm$ 0.005 <sup>a</sup>	0.779 $\pm$ 0.004 <sup>a</sup>

\*不同處理有不同英文字母者，具顯著差異( $p < 0.05$ )。



### 三、白楊樹與太陽麻重金屬分析成果

一如前述，本年度已於 6 月與 9 月兩度修剪白楊樹並採集枝葉進行植體重金屬分析，且加以秤重供復育效益評析之用。兩次白楊樹之重金屬分析結果列於表 4-15 與表 4-16，由此結果指出，土壤中污染量最高之 Zn，在各試驗區植體中有明顯之吸收累積量，Ni 次之，再其次為 Cu 與 Cr。而第二次之鋅分析值明顯高於第一次，可能是生長期較長而有較多之吸收累積量，而其餘三者則差異不大。

至於太陽麻部分，第一年之分析值列於表 4-17，本年度之測值則如表 4-18 所示。由兩年度之測值可知，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，復因地上部植體生長所致之稀釋效果，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亦以鋅最大，其餘三個主要污染元素 Cu、Cr、Ni 之含量則相當，不過略呈  $Cu > Ni > Cr$  之現象，此結果與 Kabafa-pendias 及 Pendias 研究所得，微量元素被植物攝取之容易度依序為  $Cd > Zn > Hg > Cu > Pb > As > Ni > Cr$  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  $Mn > Zn > Cd > Cu > Pb$  相符。而其對重金屬之良好植生復育效果亦與其他研究結果一致 (Burken and Schnoor, 1998；Sebastiani et al., 2004)。

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。PR1 與 PR2 之含量較其他試區高，亦與其高重金屬濃度相符。不過，污染相對較嚴重的 BP3 卻無高重金屬累積量，是否因高污染而抑制根部之吸收有待持續觀察。

總結言之，雖然各區白楊樹與太陽麻之發育略有差異，但兩種植物皆可於試驗區中生存與生長，顯示兩者對於本場址之污染物皆有相當之耐受性與適應性，有益於後續之污染物改善試驗。

表 4-15 第一次白楊樹重金屬分析值

編號	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	mg/kg					
BP1	5.75	1038	ND	12.6	1.75	ND
BP2	8.13	725	0.25	11.0	5.88	ND
BP3	6.63	500	ND	8.50	2.25	ND
PR1	7.13	526	0.25	7.75	5.00	ND
PR2	7.13	1050	0.25	8.25	2.75	ND
CK	6.13	491	0.25	6.38	1.25	ND
MDL	<0.24		<0.16			

表 4-16 第二次白楊樹植體重金屬分析值

編號	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	(mg/kg)					
BP1	9.50	1850	0.25	9.75	1.00	ND
BP2	9.00	975	0.25	6.75	2.00	ND
BP3	9.00	1725	0.25	13.5	0.25	ND
RP1	10.8	2750	0.25	14.8	2.00	ND
RP2	8.25	2050	0.25	7.25	1.50	ND
CK	9.25	548	0.75	5.75	1.00	ND
MDL						0.24

表 4-17 第一年太陽麻植體之重金屬含量

項目 編號	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	(mg/kg)					
地上部						
MDL	1.25	0.250	0.100	2.25	1.25	2.88
CK	9.99	44	0.397	7.49	ND	ND
BP1	17.4	461	ND	15.0	6.23	ND
BP2	10.0	200	ND	7.50	1.25	ND
BP3	12.5	293	ND	12.5	1.25	ND
PR1	21.1	659	ND	27.7	19.8	ND
PR2	17.5	487	0.160	22.5	12.5	3.75
根						
CK	13.7	76	0.159	26.2	61.0	ND
BP1	30.6	885	0.206	25.7	38.6	ND
BP2	56.8	515	ND	23.1	30.2	28.4.
BP3	30.3	440	ND	23.8	32.5	6.50
PR1	54.1	1083	ND	32.0	19.7	ND
PR2	42.5	1836	ND	53.7	48.7	ND

表 4-18 第二年太陽麻植體之重金屬含量

項目 編號	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	(mg/kg)					
地上部						
MDL	0.250	3.13	0.125	1.25	0.375	3.38
CK	8.24	82.1	ND	3.47	1.74	ND
BP1	10.4	450	ND	59.7	10.5	ND
BP2	9.78	263	ND	6.70	3.90	ND
BP3	9.08	265	ND	6.96	1.74	ND
PR1	10.9	430	ND	6.86	4.24	ND
PR2	17.6	317	ND	7.57	2.73	ND
根						
CK	9.35	77.0	ND	46.1	132	ND
BP1	21.0	685	ND	17.6	22.5	ND
BP2	18.2	574	ND	20.9	52.6	ND
BP3	39.6	1328	ND	27.6	52.5	ND
PR1	34.3	1211	ND	20.1	23.3	ND
PR2	26.9	681	ND	37.4	39.0	ND

## 4.6 復育效益評析

由上述結果可知，本計畫連續兩年對此油品及重金屬污染場址所進行之復育工作，就生物復育成果而言，由將近兩年之土壤 TPH 分析資料可知，三個生物復育區之 TPH 濃度隨著時間雖仍有高低不規則之變化，但大體上呈現降低趨勢，尤其濃度相對較低之 BP1 及 BP2 兩區，除 120 公分土層外，其他土層之改善效果較明顯，部分試區可達 99% 之減量效果，且部分土層已低於土壤污染管制標準。至於高污染之 BP3 區雖復育成效相對較低，但亦呈降低趨勢。

其次，連續兩年對白楊樹與太陽麻所進行之生育調查，以及對白楊樹所做之淨光合作用率及葉綠素螢光暗適應後的最大光化學效益測定，兩項結果都顯示，污染區植物生長狀況良好，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，故皆為本污染場址適合之復育植物。

此外，兩年度兩種植體重量金屬含量之測值都顯示，主要污染元素 Zn、Cu、Ni、Cr 在污染區植體中皆有吸收累積現象，且白楊樹生長快速，而太陽麻生長 10 週後即可採收，故可藉由植體之修剪與移除而逐漸降低污染程度，達到改善污染之目的。本年度共播種培育且收穫三期太陽麻，而白楊樹亦分別於六月與九月修剪枝葉，收成或修剪後之植體經烘乾後秤重，且取部分進行植體重量金屬含量分析，再由其生質量（以乾重計）與植體重量金屬濃度計算其吸收移除量。表 4-19 為各試驗區三期太陽麻之乾重，而其重量金屬分析值列於表 4-20。由於太陽麻係分別分析其地上部與根部之重量金屬含量，故其重量與重量金屬吸收移除量亦分別計算之，結果分別列於表 4-21 與表 4-22，兩者之和即為第一期太陽麻之重量金屬移除總量（表 4-23）。由表中資料可知，太陽麻對重量金屬之吸收移除量多寡依序為 Zn（50.8 g）> Cu（1.735 g）> Ni（1.186 g）> Cr（0.331 g）。

表 4-19 各試驗區三期太陽麻之乾重

編號	第一期	第二期	第三期*	總重
	kg			
BP1	11.8	7.3	8.1	27.2
BP2	11.4	7.1	7.4	25.9
BP3	10.4	6.4	7.1	23.9
PR1	5.7	3.1	3.7	12.5
PR2	13.2	9.5	8.6	31.3
Total	52.5	33.4	34.9	120.8

表 4-20 第一期太陽麻地上部重量與重金屬移除量

編號	乾重	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	kg	mg					
BP1	10.2	106	4590	----	60.9	107	----
BP2	9.80	95.8	2577	----	65.7	38.2	----
BP3	8.60	78.1	2279	----	59.9	15.0	----
PR1	4.60	50.1	1978	----	31.6	19.5	----
PR2	11.2	197	3550	----	84.8	30.6	----
Total	44.4	527	14974	----	303	210	----

----表該重金屬測值為 ND，故無移除量。

表 4-21 第一期太陽麻根部重量與重金屬移除量

編號	乾重	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	kg	mg					
BP1	1.6	33.6	1096	----	28.2	36.0	----
BP2	1.7	30.9	976	----	35.5	89.4	----
BP3	1.7	67.3	2258	----	46.9	89.3	----
PR1	1.1	37.7	1332	----	22.1	25.6	----
PR2	2.1	56.5	1430	----	78.5	81.9	----
Total	8.2	226	7092	----	211	322	----

----表該重金屬測值為 ND，故無移除量。



**表 4-22 第一期太陽麻之重金屬移除總量**

編號	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	mg					
BP1	140	5686	----	89.1	143	----
BP2	127	3553	----	101	128	----
BP3	145	4537	----	107	104	----
PR1	87.9	3310	----	53.7	45.1	----
PR2	254	4980	----	163	112	----
Total	753	22066	----	514	143	----

----表該重金屬測值為 ND，故無移除量。

**表 4-23 全年太陽麻之重金屬移除量**

期別	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	g					
第一期	0.753	22.07	----	0.514	0.143	----
第二期	0.479	14.04	----	0.327	0.091	----
第三期	0.503	14.69	----	0.345	0.097	----
總量	1.735	50.80	----	1.186	0.331	----

----表該重金屬測值為 ND，故無移除量。

其次，以白楊樹剪除枝葉之乾重與其重金屬分析值計算其移除量。表 4-24 與表 4-25 為兩次白楊樹剪除枝葉之乾重，以及依據兩次植體重金屬分析值（表 4-15 與表 4-16）計算而得之重金屬移除量，兩者之和即為重金屬移除總量（表 4-26）。由表中資料可知，白楊樹對重金屬之吸收移除量依序為 Zn(33.2 g) > Ni(0.260 g) > Cu(0.188 g) > Cr(0.048 g)。

**表 4-24 第一次白楊樹剪除枝葉之乾重與重金屬移除量**

編號	乾重	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	kg	mg					
BP1	1.55	8.91	1609	----	19.5	2.71	----
BP2	1.17	9.51	848	0.30	12.9	6.88	----
BP3	0.67	4.44	335	ND	5.7	1.51	----
PR1	1.24	8.84	652	0.31	9.6	6.2	----
PR2	3.47	24.7	3644	0.9	28.6	9.54	----
Total	8.10	56.4	7088	1.5	76.3	26.8	----

----表該重金屬測值為 ND，故無移除量。

表 4-25 第二次白楊樹剪除枝葉之乾重與重金屬移除量

編號	乾重	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	kg	mg					
BP1	2.11	20.0	3904	0.528	20.6	2.11	----
BP2	3.64	32.8	3549	0.910	68.2	7.28	----
BP3	2.35	21.2	4058	0.588	31.7	0.588	----
PR1	2.27	24.5	6242	0.568	33.6	4.54	----
PR2	4.07	33.6	8344	1.02	29.5	6.11	----
Total	14.4	132.1	26097	3.61	183.6	20.6	----

----表該重金屬測值為 ND，故無移除量。

表 4-26 全年白楊樹之重金屬移除量

次別	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	g					
第一次	0.056	7.09	0.002	0.076	0.027	----
第二次	0.132	26.1	0.004	0.184	0.021	----
總量	0.188	33.2	0.006	0.260	0.048	----

----表該重金屬測值為 ND，故無移除量。

最後，將本年度三期太陽麻與兩次白楊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 4-27）。表中資料顯示，太陽麻對重金屬之吸收移除量較白楊樹多，若比較兩種植物體中之重金屬分析值，以污染最嚴重之鋅為例，第二次白楊樹之分析值較太陽麻高，故兩者重金屬移除量之差異，主要為三期太陽麻之乾重（120.8 kg）大於兩次白楊樹之乾重（22.5 kg）所致。未來白楊樹長大而產生更多之生質量後，其移除量將會提高。

若以各試驗區之面積、污染深度（1.2 m）與土壤總體密度（ $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）計算各區土壤中之重金屬污染量並予加總，可得本場址五個試驗區之重金屬總含量分別為 Zn 1084 kg、Cu 27.5 kg、Ni 21.0 kg、Cr 47.0 kg，相較於本年度各重金屬之移除量，其移除之比例仍低，未來可藉由增加太陽麻栽植次數，加以白楊樹增長而增加生質量，進而提高其移除量，但估計復育期程仍甚長，此為植生復育常見之現象。以主要污染物重金屬鋅為例，由污染區白楊樹修剪與太陽麻拔除所移除之重金屬量(84 克/年)，與土壤中鋅之總推估量(1,084 公斤)相較，欲達整治目標，約需 12,905 年，惟白楊樹未來長大成熟後，其生質量估計可增加 60~100 倍，故可

將復育時程縮短至約 100~200 年。相較於有機污染物之快速復育成果，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。

表 4-27 全年太陽麻與白楊樹之重金屬移除量

植物種類	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb
	g					
太陽麻	1.74	50.8	----	1.19	0.33	----
白楊樹	0.188	33.2	0.006	0.26	0.05	----
總移除量	1.93	84.0	0.006	1.45	0.38	----

----表該重金屬測值為 ND，故無移除量。

## 4.7 章節摘要

本年度之執行成果為：

### 一、試驗區管理：

每天以自動噴灑設施及人工灑水，定期清除雜草、施肥且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進行三次蚯蚓施放與分解菌施灑。

### 三、植生復育試驗施作：

本年度完成三期太陽麻栽植與兩次白楊樹修剪枝葉，且將植株進行生質量調查與植體分析。

### 四、土樣採集與分析：

(一) TPH 復育效果顯示，(1)各試驗區之 TPH 多有不同程度之降低，以各區之最高濃度而言，BP1 由 87501 mg/kg 減至 43185 mg/kg，BP2 由 14878 mg/kg 降至土壤污染管制標準以下，PR1 由 51721 mg/kg 減至 7296 mg/kg，PR2 由 73661 mg/kg 減至 56757 mg/kg，僅 BP3 為例外，由 76524 mg/kg 不減反增至 81769 mg/kg。(2)就各試驗區之同一土層深度觀之，三個生物復育區之 TPH 濃度隨著時間雖仍有高低不規則之變化，但似乎呈現降低趨勢，除因土壤之非均質性導致部分土層之濃度不減反增外，其餘土層之減量百分比介於 39%~100%，且

部分土層之濃度已低於土壤污染管制標準。(3)淺層土壤(0~60 公分)之改善效果較深層土壤佳，可能是上述復育生物多在此範圍活動之故。至於植生復育區 (PR1 及 PR 2) TPH 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，有半數土層之濃度已降至土壤污染管制標準以下，但仍有半數土層高於土壤污染管制標準。

(二) 重金屬復育效果顯示，(1)主要污染重金屬 (Zn、Cr、Cu、Ni) 在各試驗區同一土層之濃度呈現無規則之變化趨勢，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改善效果十分有限。

### 五、植物生理調查與採樣分析：

(一) 白楊樹生理調查結果指出，(1)各區之淨光合作用率測值並無顯著差異，而所有植株之  $F_v/F_m$  測定值皆高於 0.777，顯示白楊樹在試驗地生長良好，足證其對試驗場址之污染物確有良好之耐受力與適應力，為本場址合適之植生復育樹種。(2)再就生育調查結果論之，白楊樹第一年四次調查之成長率為 55~213%，，第二年之成長率高達 245~310%，顯見白楊樹確可適應污染物並快速生長，除對污染改善具有正面效益，亦對原本雜草叢生之試驗區產生綠美化之效果。

(二) 太陽麻之生育調查數據指出，無論是株高或乾濕重都以 CK 區最高，而在五個處理區中，重金屬濃度最高之 PR1 及 PR2，其測值呈現較低之現象，可見污染物對兩種植物之發育或有抑制之可能，值得持續觀察。

(三) 最後就植體分析結果觀之，白楊樹對土壤中污染量最高之 Zn，在各試驗區植體中皆有明顯之吸收累積量，Ni 次之，再其次為 Cu 與 Cr。至於太陽麻之重金屬測值皆為根部之含量大於地上部。而各重金屬在植體中之吸收累積量亦以鋅最大，其餘三個主要污染元素 Cu、Cr、Ni 之含量差異不大，不過略呈  $Cu > Ni > Cr$  之現象。此外，比較各區植體中之含量顯示，CK 區之植體含量最低，此與其土壤中之最低含量一致。PR1 與 PR2 之含量較其他試區高，亦與其高重金屬濃度相符。總結言之，兩種植物皆可於試驗區中生存與生長，顯示兩者對於本場址之污染物皆有相當之耐受性與適應性，有益於後續之污染物改善試驗。

### 六、復育效益評析：

總結兩年之試驗結果顯示，蚯蚓與石化分解菌確可於污染場址生存並發揮降

解 TPH 之功效；白楊樹與太陽麻亦可忍受並適應污染物，且對重金屬具有吸收累積與移除效益。將收成之太陽麻與修剪後之白楊樹植體乾重與重金屬濃度計算其總移除量，分別為 Zn (84 g) > Cu (1.93 g) > Ni (1.45 g) > Cr (0.38 g)。此移除量若與五個試驗區推估之重金屬總含量 Zn 1084 kg、Cu 27.5 kg、Ni 21.0 kg、Cr 47.0 kg 相較，其移除比例甚低，故復育重金屬污染所需之期程甚長。以主要污染物重金屬鋅為例，由污染區白楊樹修剪與太陽麻拔除所移除之重金屬量與土壤中鋅之總推估量相較，欲達整治目標，約需 12,905 年，惟白楊樹未來長大成熟後，其生質量估計可增加 60~100 倍，故可將復育時程縮短至約 100~200 年。

## 參考文獻

- 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。
- 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、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。
- 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.
- 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.
- Critchley, 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.
- 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.
- 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.
- 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. *Bullutin of Zoology*. 50(1): 1-8.

- 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.
- 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.
- 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 植體重金屬檢測品保數據

品保品管樣品名稱		查核樣品分析			
檢驗項目	檢量線	QC 標準值	分析值	回收率	管制標準
	R	mg/L		%	
Pb	0.9996	1.00	1.07	106.9	80-120
Zn	0.9994	1.00	1.02	102.2	
Cd	0.9998	1.00	1.03	103.3	
Ni	0.9998	1.00	1.12	111.5	
Cr	0.9998	1.00	1.06	106.4	
Cu	1.000	1.00	0.989	98.9	
重複樣品分析					
檢驗項目		分析值 1	分析值 2	差異百分比	管制標準
		mg/L		%	
Pb		0.027	0.027	0.0	0-20
Zn		5.698	5.363	6.1	
Cd		0.001	0.001	0.0	
Ni		0.136	0.148	8.5	
Cr		0.176	0.187	6.1	
Cu		0.170	0.169	0.6	
添加樣品分析					
檢驗項目		添加量	檢出量	回收率	管制標準
		μ g		%	
Pb		12.5	13.1	105	80-120
Zn		50.0	52.9	106	
Cd		10.0	9.20	92	
Ni		10.0	11.0	110	
Cr		10.0	10.4	104	
Cu		10.0	9.63	96	

## 附錄 2 土壤重金屬檢測品保數據

(第一次)

品保名稱		查核樣品分析	重複樣品分析	添加樣品分析
檢驗項目	偵測極限	回收率	差異百分比	回收率
	MDL(mg/kg)	%		
Pb	4.10	101.5	4.4	102.7
Zn	0.62	100.2	2.3	100.4
Cd	0.26	98.0	4.0	102.5
Ni	1.22	101.1	3.9	100.3
Cr	1.30	99.9	3.9	98.8
Cu	0.88	99.8	4.2	100.0

(第二次)

品保品管樣品名稱		查核樣品分析	重複樣品分析	添加樣品分析
檢驗項目	偵測極限	回收率	差異百分比	回收率
	MDL(mg/kg)	%		
Pb	4.10	102.8	7.9	93.8
Zn	0.62	102.9	4.3	104
Cd	0.26	100.1	10.1	111.7
Ni	1.22	96.4	8.8	105.0
Cr	1.30	88.0	6.5	101.4
Cu	0.88	100.6	4.5	97.7

### 附錄 3 土壤 TPH 檢測品保數據

n-alkane	MDL(mg/L)	查核樣品回收率(%)
Decane (C <sub>10</sub> )	0.05	82.8
Undecane(C <sub>11</sub> )	0.08	93.9
Dodecane(C <sub>12</sub> )	0.10	90.3
Tridecane(C <sub>13</sub> )	0.09	97.3
Tetradecane(C <sub>14</sub> )	0.15	104.2
Pentadecane(C <sub>15</sub> )	0.14	98.8
Hexadecane(C <sub>16</sub> )	0.17	99.9
Heptadecane(C <sub>17</sub> )	0.21	98.3
Octadecane(C <sub>18</sub> )	0.25	99.1
Nonadecane(C <sub>19</sub> )	0.20	103.3
Eicosane(C <sub>20</sub> )	0.23	98.3
Heneicosane(C <sub>21</sub> )	0.25	97.4
Docosane(C <sub>22</sub> )	0.29	87.3
Tricosane(C <sub>23</sub> )	0.23	95.1
Tetracosane(C <sub>24</sub> )	0.20	94.3
Pentacosane(C <sub>25</sub> )	0.21	89.5
Hexacosane(C <sub>26</sub> )	0.17	82.1
Octacosane(C <sub>28</sub> )	0.23	80.1
triacontane(C <sub>30</sub> )	0.56	80.3
Dotriacontane(C <sub>32</sub> )	0.29	83.0
Hexatriacontane(C <sub>36</sub> )	0.78	80.6