



環境部環境管理署

112 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

油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排 係數調查研究

成果報告書（定稿）

主辦單位： 環境部環境管理署

專案執行單位：國立中山大學/環境工程研究所

專案主持人：彭彥彬 教授

專案執行期間：112 年 12 月 15 日起至
113 年 11 月 29 日止

中 華 民 國 113 年 12 月 印製



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

□構想書 □申請計畫書 □期中報告
□修正計畫書 ■成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	□先導型 ■研究型 □模場型
計畫類別	■調查 □整治 □其他	主持人：彭彥彬	NO：B1
計畫名稱	油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員一			
1. 本計畫的主題為「油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究」，但 5.1 節結果討論開頭即說明「CO ₂ 逸散濃度在實驗室中的量測濃度皆未有顯著變化，測量值僅為大氣中的背景濃度值，因此，無法探討 CO ₂ 逸散濃度於田口實驗的結果。」應有合理的原因說明（例如氣罩遮蔽的採樣時間是否太短需調整？）。		1. 謝謝委員建議與指教，根據文獻(Yang, J., et al. 2018)顯示，自然界中的微生物在分解 TPH 的反應過程會產生 CO ₂ 。因於實驗室進行田口實驗之污染土壤為測量當日進行配置，無經過微生物分解作用，不會產生 CO ₂ 。因此，於實驗室測量不到 CO ₂ 的逸散濃度。	
2. 文末於高雄某碼頭污土量測結果可測得高濃度 CO ₂ 逸散，但帶回實驗室 3kg 的風化土壤又無法測結果，應有相關的原因改良量測方法說明。		2. 謝謝委員指教，因帶回實驗室 3kg 的風化土其土壤量相對於現場甚小，且帶回途中會產生逸散情形。因此，CO ₂ 的逸散濃度主要還是以現場量測的結果較具探討性，也較符合場址實際的逸散情形。	
3. VOCs 逸散濃度實驗數據三重複的分析結果有的組數變異很大，最後用平均值計算田口試驗的 S/N 比以評估各因子的影響。		3. 謝謝委員指教。VOCs 逸散濃度值最高為 93.27 ppm、最低為 4.7 ppm。平均濃度值最高為 EXP5 之 93.27 ppm，最低為 EXP2 之 6.31 ppm，平均 S/N 比介於 15.42-39.39%。濃度平均值(y 值)最高之三個組別為 EXP5、EXP6 及 EXP7，濃度分別為 93.27、57.27 及 59.87 ppm。由因子表可初步得知，此三組之柴油濃度皆較高(20,000 mg/kg)，土壤質地皆為砂質黏壤土，兩組土壤含水率較低(15-25%)，兩組灑水次數較少(1 次)，兩組翻土次數較多(3 次)，皆可能為導致濃度較高之原因。討論詳見 5.3 節。	
4. 文章部分編排呈現方式需修正：(1) 5.4.2 節的目錄頁碼對應錯誤；(2) 圖 3.6 的中結果無法辨別 a、b、c、Study #1、Study #2 等待表意義與差異；(3) 請說明 4.7 節 VOC 分子量 78.95g/mol 的模擬物種為何；(4) p.39「由表 5.14 可得知 8 組實驗結果中，VOCs 逸散濃度值最高為 93.27 ppm、最低為 4.7 ppm」，對應表號與最大數值均誤植；(5) p.42-45 的圖表與討論內容、章節編排等均不對應，且未說明田口試驗的最佳化品質目標為何，請修正。		4. 謝謝委員指教。(1)已修正。(2) 其文獻研究表示 study 2 相較於 study 1 經整治 2 個月後，低碳數的化合物透過生物和非生物過程從污染土壤中去除的速度比高碳數的化合物更快，可得知移除機制已揮發為主。(3)其模擬物種為常見的「苯」。(4)文中已修正為表 5.15，至	
5. 建議針對研究成果的未來應用可行性提供更具體的說明與實施步驟。			
6. 期末成果達成一篇研討會論文與 3 位碩士生			



<p>的培養，國外期刊論文的投稿尚待完成。</p>	<p>於最高值 93.27 ppm 已加註是從平均值(y 值)該欄數據挑選之最高濃度組別。(5)已修正。</p> <p>5. 謝謝委員建議，針對未來應用可行性已補充於結論 6.1 節之第 3 點至第 7 點。</p> <p>6. 謝謝委員提醒，敝團隊目前已於中華民國環境工程學會年會 2024 土壤及地下水研討會發表論文，SCI 文章亦正在準備中。</p>
<p>委員二</p> <p>1. 根據本計畫「油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究」所提成果報告，研究計畫已完成相關文獻、資料收集與彙整、土壤模擬器之設計、VOCs 氣體逸散檢測(含實驗室及現場監測)、田口實驗等工作項目。</p> <p>2. 本計畫成果報告之研究顯示:田口實驗針對 VOCs 逸散濃度之品質特性望大分析顯示，各因子對於 VOCs 逸散之影響程度依序為:柴油濃度、含水率、灑水次數、翻土次數、灑水與翻土順序、土壤質地及氧化劑添加。實場研究結果顯示，VOCs 逸散濃度受溫度影響程度大於 CO₂，且土壤含水率較低之土壤，其溫度影響越顯著。其土壤經過翻動後之一小時內，CO₂ 逸散濃度相較於 VOCs 較穩定，VOCs 逸散濃度下降率約為 30-45%，而 CO₂ 則可維持初始值之濃度。上述各項結論與油污染生物復育(生物堆法、土耕法)操作息息相關，具有實務操作參考與應用價值。</p> <p>3. 建議研發團隊後續若將針對本項研究進一步延伸探討，新計畫可納入對於:</p> <p>1. 混合污染物種(如同時有汽、柴油污染之土壤)生物復育操作之空氣污染物逸散研究。</p> <p>2. 除 VOCs 逸散濃度、通量外，亦可考慮將 VOCs 逸散成分分析納入研究。</p> <p>3. 生物復育操作之 VOCs 污染物逸散對健康風險之影響。</p>	<p>1. 謝謝委員的肯定與鼓勵。</p> <p>2. 謝謝委員的肯定與鼓勵。</p> <p>3. 謝謝委員所提出的三項建議，敝團隊加以參考。</p>



<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 成果績效自評表申請預估投稿一篇期刊論文，但目前尚未達成，請補充結案後半年是否會投稿或說明原因。 2. 第7頁表 3.1:氧化劑技術發展程度中所列舉 Fenton 與過硫酸鹽技術發展程度已多年運用於台灣實場且成功。建議修正。 3. 土耕法(Land farming)與生物堆法(biopile)操作上不同，土耕法利用機械翻拌及土壤厚度較低，生物堆土層較高，使用管線抽氣(如圖 3.1、3.2)。二者 VOCs 逸散性可能不同。所以本計畫實驗設計比較是對應土耕法。 4. 因為未量測土壤 TPH 濃度變化，及揮發濃度是以 VOCs 總量表示，所以無法鏈結兩者關係(例如當土壤中 TPH 為 20000 mg/kg TPH 時逸散 2000 ppm VOCs 相當於 0.0% 土壤 TPH 會逸散)甚是可惜。 5. 5.4.2 節 CO₂ 逸散特徵:雖然圖 5.13、5.14 CO₂ 逸散趨勢與 VOCs 逸散趨勢相近，但 CO₂ 的逸散是否因為 TPH 生物分解相關? 6. 成果摘要認為 VOCs 逸散之影響程度依序為:柴油濃度、含水率、灑水次數、翻土次數、灑水與翻土順序、土壤質地及氧化劑添加。此為定性之描述，建議提供 VOC 逸散量化值。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員提醒，敝團隊目前已於中華民國環境工程學會年會 2024 土壤及地下水研討會發表論文，SCI 文章亦正在準備中。 2. 謝謝委員提醒，已修正為「已應用於場址」。 3. 謝謝委員建議，對應「土耕法」較為準確。 4. 謝謝委員建議，本研究有嘗試過量測土壤 TPH 變化，但每次分析的土壤量僅 5 公克，其數值無穩定趨勢；此外，測量 VOCs 逸散濃度也無法進行持續性監測，所以無法鏈結兩者關係。 5. 謝謝委員建議，根據文獻(Yang, J., et al. 2018)顯示，自然界中的微生物在分解 TPH 的反應過程會產生 CO₂。因此，本研究於場址現場可測量到 CO₂ 之逸散，然而於實驗室配置之新鮮污染土卻測量不到的原因。 6. 謝謝委員建議，已於結論 6.1 節之第 2 點加以補充。
<p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 專案成果績效自評表仍然勾選為期中，請修正。 2. 本研究實驗室實驗採用 3 公斤土壤至於塑膠盆於實驗室進行各項控制條件測試(5.4.4 節)。請說明實驗室土壤面積深度及翻土方式，並列表與現地實驗作比較，在結論中提到 1 小時內的 VOC 下降與現場量測結果相似，然而受限於土壤量、實際的與大氣平衡的通量條件不一樣，請說明實驗結果代表的意義?研究結果顯示翻土、灑水的影響明顯，然而操作條件參數，均未說明，請補充。 3. 未來現地應用研究，受到季節變化的影響，應該會與實驗室的短期研究差異性 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員提醒，已勾選為成果。 2. 謝謝委員指教，實驗室實驗採用 3 公斤土壤其堆置為土堆的形狀，模擬生物堆，至於土壤面積略小於氣罩面積(35*25 cm)。其他詳細實驗參數於 P.55 說明。此外，實驗室量測實驗亦於室外進行，與大氣平衡的通量條件相同。因此，結論中提到 1 小時內的 VOCs 下降與現場量測結果相似，可推測其下降趨勢不受土堆高度與土壤量之影響，應符合多數場址之逸散情況。 3. 謝謝委員指教，因季節的變化主要影響場址氣溫。根據研究結果及文獻顯示，氣溫與 VOCs 排放量呈正相關。可得知於夏季整治時，需多加注意 VOCs 的逸散情況。至於整治相關工法之灑水與翻土對於 VOCs 逸散之關



<p>大，如何讓其能夠獲得最適宜的應用操作條件請說明。</p> <p>4. 請根據本年度研究，結果提出未來現地試驗的研究規劃。請根據本年度研究結果，提出未來現地試驗的研究規劃。</p>	<p>係並不會隨季節或溫度不同而改變。因此，於實驗室所進行的田口實驗因子之結果，皆為適宜的應用操作條件。</p> <p>4. 謝謝委員建議，敝團隊加以參考。</p>
<p>委員五</p> <p>1. 專案執行進度符合期末預定查核點之工作項目內容。</p> <p>2. 報告書 P.57 及 P.58 提及圖 5.22，應修正為圖 5.21。</p> <p>3. 6.1 結論(「此外，土壤含水率低之土壤，越易受溫度。」，文字應未繕打完畢，請再檢視修正。</p> <p>4. 本計畫目的提及評估逸散特性結果可於「整治過程之空氣污染防治因應措施提供有效建議」，如於計畫範圍內，建議可補充相關建議。</p> <p>5. P.53 倒數兩行，高濃度之污染可能會抑制土壤微生物之呼吸作用，導致 CO₂ 排放量較低。請問參考的兩篇文獻(Liang et al.,2009、Liang et al.,2009)是否有提到好氧呼吸和厭氧呼吸皆會被抑制，若僅提到好氧呼吸會被抑制，建議將呼吸作用改為好氧呼吸作用，更為精確。</p> <p>6. 請問 VOCs 排放量和 CO₂ 排放量是否會互相影響，建議搜尋相關文獻做討論，因在土壤中微生物呼吸作用無被抑制的情況下，CO₂ 排放量可能會受生物可及性(及生物有效性(影響；VOCs 排放量高，土壤中的油品揮發導致微生物可降解的油品含量變少，可能影響 CO₂ 排放量。</p>	<p>1. 謝謝委員鼓勵於肯定。</p> <p>2. 謝謝委員提醒，已修正。</p> <p>3. 謝謝委員提醒，已重新繕打。</p> <p>4. 謝謝委員建議，相關整治過程之空氣污染防治因應措施已補充於結論 6.1 節。</p> <p>5. 謝謝委員建議，參考的兩篇文獻(Liang et al.,2009、Liang et al.,2009)僅提及高濃度之石油污染可能對土壤微生物呼吸的抑製造成 CO₂ 排放量較低。依文獻得知，厭氧環境主要產生甲烷。因此，已將呼吸作用修正為好氧呼吸作用，更為精確。</p> <p>6. 謝謝委員建議，文獻未提及 VOCs 及 CO₂ 的排放關係，主要原因為其機制上的不同。VOCs 之逸散氣體主要為碳數 6 至 9 之化合物，CO₂ 則為微生物分解油品及行呼吸作用產生。此外，碳數 6 至 9 之逸散 VOCs 僅占柴油重量百分比約 0.344%至 2.7%，與微生物分解之碳數 10 以上化合物比較，其重量百分比占比甚小。因此當 VOCs 排放量高時，並不會顯著造成微生物可降解的油品含量變少，而影響 CO₂ 排放量之情形。</p>



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☒期中報告
☐修正計畫書 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：彭彥彬	NO：B1
計畫名稱	油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員一		1. 謝謝委員肯定與鼓勵。	
7. 研究目前已產出 1 篇國內研討會論文與 1 篇國際期刊論文，並有 3 位碩士生參與研發，有初步研究成果並培育相關人才。		2. 謝謝委員提醒，敝團隊加以修正。	
8. 報告撰寫 (1) p.2-4 有多個錯字、重複文字、上下標標示錯誤、(2) 部分文句似用軟體翻譯語意不順 (如 p.14-15) 等應修正。		3. 謝謝委員指教，因此實驗前之土壤逸散氣體量測，主要是利用 GC/FID 之圖譜以確認碳數範圍。本研究實測土壤逸散氣體時皆有探討溫度與 VOCs 逸散之關聯。	
9. 表 4.1 中的三種不同濃度柴油污染砂質土於室溫下 14 天後之 TPH(C ₆ -C ₉)逸散濃度是使用血清瓶在密閉暗處 14 天後抽上層揮發氣體的分析結果，因人工配置土壤密實度與環境溫度會大幅影響實驗結果，應有至少三重複實驗以確認數據的代表性，並探討分析量與溫度的關係。		4. 謝謝委員指教與建議，本研究之實驗會進行三重複；並對實場風化土進行量測，有足夠的數據量以確認結果的代表性。	
10. 使用 7 因子二水準的田口試驗 L8 共 8 組，屬初篩各因子的影響，探討區間精度較差，且因人工配置土壤密實度與環境溫度會大幅影響實驗結果，應有重複實驗以確認數據的代表性，並探討分析量與溫度的關係。		5. 謝謝委員建議，加入土壤之過氧化氫濃度為 9%，體積為 100 mL，補充於 4.2 節。	
11. 4.4 節「每立方米土壤中添加 500 到 1500 克的過氧化氫」應說明使用濃度。		6. 謝謝委員提醒，已補充於 4.7 節。	
12. 4.7 節「單位土壤重之 VOCs 逸散量計算」應說公式內係數的意義與單位。		7. 謝謝委員提醒，已補充於 4.8 節。	
13. 4.8 節「單位土壤重之二氧化碳排放當量」說公式內係數的意義與單位。		8. 謝謝委員指教，敝團隊經查閱文獻得知，溫度與逸散濃度呈正相關。雖然 EXP1 與 EXP2 溫度差異較大；然而經田口實驗方法分析，EXP1 與其他土壤組別同樣具有因溫度產生的一致性差異。因此，溫度的差異不會直接影響田口方法找出之影響因子代表性。	
14. 目前已完成田口的 2 組實驗 (EXP1 & EXP2)，溫度範圍差異大 (32-33.5°C vs 24-33°C)；且 EXP1 測得 TPHg、VOCs、及 200 分鐘前的 CO ₂ 逸散濃度均較 EXP2 組別高，但溫度並非本計畫田口實驗設計的探討因子之一，其對實驗結果的影響如何排除？否則最後使用田口方法找出關鍵影響因子將			



不具代表性。	
<p>委員二</p> <p>4. 本計畫「油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究」期中報告內容、已完成相關文獻、資料收集與彙整、土壤模擬器之設計、氣體檢測、田口實驗方法解析汽柴油污染土壤整治之空氣污染物排放特徵等工作項目，內容與成果符合原提案計畫之預定進度。</p> <p>5. 本計畫期中報告已針對目前進程及實驗結果提出相關討論與建議，並可據以進行後續下半年研發工作之推展。</p> <p>6. 本計畫之目標為研究受油品污染之土壤逸散之氣體特徵及估算其碳排放量，並研究受油品污染土壤之空氣污染物特性，以供後續評估這些逸散氣體對環境和人類健康的影響；實驗設計係以人工調配之受油品污染之土壤為實驗材料，其污染濃度、污染物分布及風化程度等皆與實際油品污染場址之污染土壤狀況有所差異，研究結果土壤氣體逸散之污染排放量可能高於實際場址測得之逸散量，建議研究團隊針對此一議題加以探討，並考慮未來將實場監測納入未來計畫範疇。</p>	<p>1. 謝謝委員肯定與鼓勵。</p> <p>2. 謝謝委員肯定與鼓勵。</p> <p>3. 謝謝委員的建議，本研究除了配置污染土進行實驗外，亦到現場場址利用密閉式氣罩法對現場之 VOCs 及 CO₂ 排放濃度進行量測，再依排放通量公式計算其場址之碳排放量。此外，因田口實驗主要是要探討其設計之七項因子對於 VOCs 之影響，無須計算其排放量，且各組土壤條件一樣，實驗也較為準確，因此田口實驗之土壤以人工方式配置。</p>
<p>委員三</p> <p>7. 多位委員建議實驗室測試參數考量現場實作條件(例如因為人力限制，每日翻攪一次執行不易)，期能讓本計畫第一年之實驗室測試結果就可以貼近現場，對於未來計畫申請與撰寫會更有幫助。</p> <p>8. 土壤 biopile(生物堆)與耕犁法(Land farming)土堆高度、覆蓋、翻攪、抽送氣、澆水(營養鹽及微生物)施作方式均不同，TPH(VOC)逸散量也不同，建議主持人實驗設計時多加參考，並可於結果討論中討論比較不同工法之 VOC 逸散量。</p>	<p>1. 謝謝委員建議與指教。</p> <p>2. 因生物堆法與耕犁法的整治原理相似，皆是以好氧微生物分解污染物。經查閱相關文獻得知此兩種整治方法有時會以整合性的方式進行，並未僅使用單一方法進行整治。此外，尚有相關論文研究以結合化學氧化法進行整治。因此，本研究著重於上述提及之整治工法內容像是灑水與翻土，以模擬整治過程中 VOC 逸散之探討。</p> <p>3. 謝謝委員建議，敝團隊以有到現場利用可行的測量方法，並對 VOCs 及 CO₂ 排放濃度進行排放通量($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$)計算之。</p> <p>4. 謝謝委員建議，因本實驗方法與設計以直讀式</p>



<p>9. 現場濃度經過擴散效應應該會比實驗室測值低，所以建議數值表達增加總量或是相當於 mg TPH/kg soil，方便成果運用時輔以擴散模式推估現場值，例如目前結果顯示「以三種濃度之柴油污染土壤，三種柴油污染砂質土置於室溫下 14 天後之 TPH(C₆-C₉)逸散濃度分別為 176.99、186.63 及 241.50g/mL」，176.99g/mL 相當於多少 mg TPH/kg soil。</p> <p>10. 期中報告提供柴油測試結果，如圖 4.4 及 4.5，柴油主要為 C₁₀-C₃₅，其揮發主要是 C₆-C₉，建議分列 C₆-C₉ 逸散量佔 C₆-C₉ 總量及 C₆-C₃₅ 總量之比例。</p>	<p>儀器量測其數小時內土壤 VOCs 逸散濃度，無法計算 C₆-C₉ 逸散量佔 C₆-C₉ 總量及 C₆-C₃₅ 總量之比例。</p>
<p>委員四</p> <p>5. 模擬實驗所獲得的操作參數及條件控制未來如何應用於實場，仍需提出明確的說明，例如實驗是否控制濕度、一般溫度變化、以及風速、日照等條件，期中報告中均未提出 假設及未來的應用後續方法條件設計。</p> <p>6. 實驗設計三種不同濃度的柴油放置於室溫下的沙質土壤，均質污染土壤或非均質會有不一樣的溢散結果，建議提出說明詳細的研究設計條件。</p> <p>7. 實驗過程設計不同，灑水次數及翻土次數，以及是否添加過氧化氫，與原來研究目的所設定的三種整治方法，具有何種關聯性建議補充說明 p.24-25 的內容？</p> <p>8. 截至目前為止已完成了實驗數據量、實驗初步分析結果的代表意義建議在第五章提出說明，以目前看到的表 5.5 到表 5.7，如何結論 6.1？</p> <p>9. 6.2 節所列的後續工作重點，與原定的三種整治方法如何建立提出整治方案，請提出詳細的說明。</p>	<p>1. 謝謝委員指教，本研究以土壤放置室外進行數個月的長期量測。因此，溫度會於量測當天做紀錄；其餘像是日照、濕度等天氣相關條件並無進行控制及記錄；此外，因本實驗逸散氣體量測方法為密閉式氣罩法，已排除風速差異所造成的影響。</p> <p>2. 謝謝委員建議與指教，本實驗之柴油污染土壤為人工配置，配置過程會將柴油先溶於丙酮，確保柴油均勻地滴入土壤，並同時以鏟子攪拌，因此為均質污染土壤。</p> <p>3. 謝謝委員建議與指教，其灑水與翻土為生物堆法及土地農耕法之工法內容，因此納入實驗設計因子。至於添加過氧化氫則考慮到整治僅靠微生物分解油品，其高碳數化合物不易分解且整治時間拉長，加入過氧化氫將高碳數化合物分解成較低碳數之化合物，以促進微生物分解效率。因此，添加過氧化氫也列入實驗探討之因子。</p> <p>4. 謝謝委員建議與指教。因此結論為期中報告之初步推測，研究結論以期末報告為主。</p> <p>5. 謝謝委員建議與指教，6.2 節之後續工作要點主要是增加風化土與進行實場測量，因其逸散特徵更貼近於實際逸散情況，再結合田口實驗之結果，探討油污污染氣體逸散特徵。</p>
<p>委員五</p> <p>7. 專案執行進度符合期中預定查核點之工作項目內容。</p> <p>8. 內文頁 22 之詳細步驟，建議補充說明 VOC 與 CO₂ 量測之 POLI MP400 檢測器使用時</p>	<p>1. 謝謝委員鼓勵與肯定。</p> <p>2. 謝謝委員指教，已補充於 4.2 節。</p> <p>3. 謝謝委員建議，已補充於 4.3 節。</p> <p>4. 謝謝委員提醒，本研究之原先實驗設計 L9 直交表僅能探討 4 個因子，因考量尚有其他相關因</p>



<p>機。</p> <p>9. 建議可補充說明田口實驗於本計畫之執行方法（如直交表設計方式）。</p> <p>10. 報告摘要提及利用 L9 直交表實驗方法，而報告書內方法又以 L8 直交表為主，如為誤繕請修正或是補充說明原規劃以 L9 變成 L8 的原因。</p> <p>11. 計畫運用 NIEA W901.50B 以及 NIEA S703.62B 方法將於本年度預告廢除，將預告新的方法如 NIEA W901.51B 及 NIEA S703.63B，計畫可以參酌納入。</p> <p>12. 專案基本資料表請於定稿補上學校章。</p>	<p>子具探討意義，因此最終改為可探討 7 因子之 L8。</p> <p>5. 謝謝委員提醒，敝團隊於氣體實測實驗皆使用直讀式儀器進行量測，並未使用 NIEA 之方法。</p> <p>6. 謝謝委員提醒，敝團隊將於定稿補上學校章。</p>
--	---



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

□構想書 ■申請計畫書 □期中報告
□修正計畫書 □期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	□先導型 ■研究型 □模場型
計畫類別	■調查 □整治 □其他	主持人：彭彥彬	NO：R15
計畫名稱	油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員一		1. 謝謝委員，已修正。 2. 謝謝委員，已修正。 3. 謝謝委員鼓勵與指教。 4. 謝謝委員建議，敝團隊將依今年執行成果規劃未來實場實驗。	
15. P.3「5.2 油品特性、危害及常見之整治技術」內文中，「低碳數(C6-C9)...」，誤繕請修正。 16. P.6 內文與圖標題，「(C6-C9)」，誤繕請修正。 17. 現今油品污染場址於整治期間面臨空氣污染、異味逸散等問題，而此計畫以田口實驗方法，探討揮發性氣體逸散率相關問題並對土壤整治時之空氣污染防治設備提出建議，對整治過程具有助益，爰予以肯定。 18. 建議後續可評估實場之可行性，並加入實場實驗。			
委員二		1. 謝謝委員的建議，今年研究計畫以實驗室內之調查為主，敝團隊將依今年執行成果規劃未來實場實驗。	
7. 研究設計以砂箱實驗進行油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查，建議提出實場可行的監測方式與搭配儀器（開放空間濃度應該會比實驗室控制條件低很多，儀器的偵測極現等應考量）。			
委員三		1. 謝謝委員的建議，已補充說明土壤模擬器之設計與實驗方法於修正計畫書第 11 頁。概述如下：受限於經費，本研究年尚無計畫探討土壤中生物相，然而溫度、監測時間長短及油品降解程度等皆有納入實驗的分析項目中。 2. 謝謝委員，將依照建議評估油品降解量，做一綜合探討。	
11. 本計畫最重要的是土壤模擬器(圖 1)，建議應該詳細說明該實驗裝置與真實環境條件下之差異。例如，土壤中生物相、溫度等。另外，監測時間長短？是否監測油品降解程度與有機物、甲烷或二氧化碳之關係？ 12. 研究中擬以每月每公斤土壤排放量做估算，建議也應考慮油品降解量之因素，以更完整呈現結果。			



<p>委員四</p> <p>10. P.9，有關計畫團隊亦針對常見於土壤及地下水污染中之油品常見的組合物進行鑑定，如 MTBE、BTEX 等多種組合，且已有相關分析圖譜，建議針對分析圖譜進行補充說明，另圖 9 之分析圖較模糊建議宜修正。</p> <p>11. P.34，有關十一、研究經費(1)人事費用之保險費與退休金建議宜確認計算、(4)其他相關費用有編列 22,000 之費用，應於 P.38 補充說明，以及行政管理費依 P.38 計算應為 177,708，宜於 P.34 中修正。</p> <p>12. 有關本計畫將彙整研究成果，說明揮發性氣體逸散較低之整治方法，給予整治單位相關建議，未來提出之建議宜有具體作法並具可執行性。</p> <p>13. 本團隊針對常見於土壤及地下水污染之油品常見的組合物進行鑑定，如 MTBE、BTEX 等多種組合，實驗結果將有助於確定污染物的影響程度，為未來的整治工程與環境保護政策提供參考。</p> <p>14. 本計畫目標為研究受油品污染之土壤逸散之氣體特徵及估算其碳排放係數，研究受油品污染土壤之空氣污染物特性，瞭解土壤中揮發性氣體逸散到大氣中之濃度，可供後續評估逸散氣體對環境與人類之影響。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員提醒及建議，已修正圖 9。 2. 謝謝委員的提醒，已依照核定金額修正經費表。 3. 謝謝委員的意見，本計畫將依照研究成果提出之具體並具可執行性之低 VOC 逸散整治方法之建議。 4. 謝謝委員的鼓勵與肯定。 5. 謝謝委員的鼓勵與指教。
<p>委員五</p> <p>13. 建議應考慮未來應用時所遇到的困難進行研究。</p> <p>14. 本研究與相關文獻中研究之差異為何。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員的建議及指教，將依本研究成果提出未來應用時之挑戰。 2. 謝謝委員，本研究利用田口實驗方法，並以文獻中提及會影響空氣污染物排放的相關因子及參數進行合理的數值設計。研究結果可明確比較出各參數對於土壤整治之空氣污染物逸散量之影響情形。
<p>委員六</p> <p>1. 實驗設計建議考量場址多為老化及風化 TPH，多年吸附於土壤中，其揮發性與新鮮添加於土壤中不同。</p> <p>2. 土壤模擬器進行實驗建議考量現場 biopile 實際操作方式，包含土堆厚度、塑膠布覆蓋，</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員的建議與指教，將依照建議尋找風化土壤進行比對。 2. 謝謝委員建議，敝團隊將參考委員建議進行實驗設計調整，惟部分參數可能依照田口實驗設計限制，無法全部納入，或是以其他類似參數進行探討，例如:定期噴水以土壤濕



定期噴水、翻堆時移除覆蓋塑膠布等，以增進研究成果之實務應用潛力。	度作為影響參數討論之。
委員七 1. 塑膠桶型模擬沙箱上方非土壤空間氣體是否有條件控制，如壓力、濕度或氣體組成。	1. 謝謝委員，本研究方擬將土壤放置室外以模擬自然環境，並以靜置式氣罩法進行揮發性氣體的收集。同時測量土壤溫度、濕度及酸鹼值進行紀錄。
委員八 1. 計畫主持人及本計畫執行團隊的學術研究能力佳，足以勝任本計畫。主持人及本計畫執行團隊近五年的研究績效佳。 2. 本計畫對國內土壤及地下水污染整治的推動有貢獻。 3. 本計畫書撰寫具體完整，計畫書中已經說明本計畫的執行方式。 4. 計畫書所述的構想具可行性，且具有實務應用潛力(本計畫主要探討污染場址油品污染物因風化分解或是揮發逸散的碳排係數評估，建議可以依油品種類、污染齡、土壤質地...等等影響油品分子結構的因子加以說明)(中油公司已經有很完整的研究成果(基金會補助)，建議參考)(本計畫的成果可以用來建構本土係數)。 5. 計畫執行期限合理，也已經說明預期的研究成果。	1. 謝謝委員的肯定與認可。 2. 謝謝委員的鼓勵。 3. 謝謝委員的肯定與鼓勵。 4. 謝謝委員提供的資料，敝團隊獲益良多，遵照辦理。 5. 謝謝委員的鼓勵與指教。
委員六 1. 計畫書請雙面列印。 2. 人事費：(一)~(五) 192,000+240,000+6,056=438,056 元，與合計 436,056 元金額不符，請再確認。 3. 耗材費：消耗性器材中 GC-FID 層析管住之單位為"支"或是"式"，請確認。	1. 謝謝委員提醒。 2. 謝謝委員，已修正。 3. 謝謝委員，此單位確認為"支"。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒構想書
 ☐申請計畫書
 ☐期中報告
 ☐修正計畫書
 ☐期末報告
 審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：彭彥彬 NO：R9	
計畫名稱	油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 19. 監測土污整治過程中排放之空氣污染物，並予以系統化分析與預測，對於整體污染減輕之規劃具有助益，爰予以肯定。 20. 建議於偵測不同處理技術的污染排放時，應一併紀錄處理過程與排放有關之操作參數，以作為未來比較及預測之基準。 21. 對於整治過程中，因使用能源燃燒造成排放、以及有機污染物經過生物分解產生甲烷或是 CO ₂ …等等，應予以分別計算溫室氣體排放，以釐清不同整治技術對於溫室氣體排放的差異，作為挑選整治技術的考量因素之一，此案具有研究價值。		1. 謝謝委員的鼓勵與指教。 2. 謝謝委員的指教，後續實驗會一併紀錄與排放有關之操作參數。 3. 謝謝委員的指教，本計畫今年擬評估翻土法所逸散之空氣污染物及碳排。其他整治技術之污染物，將依照委員建議蒐集文獻後討論之。	
委員二 8. 以密閉的土壤模擬器欲量測不同土壤質地與油品種類（汽油、柴油及潤滑油）之污染土壤之空氣污染物排放特徵，並進一步估算碳排量量測土壤逸散之溫室氣體（CO ₂ 及甲烷）。實際情況會受風速、地下水位與流速等影響，是否能納入評估？		1. 謝謝委員的指教，今年尚未將場址環境因子列入評估項目，未來可依本計畫成果，進一步參照委員之建議，進行更詳細之評估。	
委員三 13. 本計畫與淨零碳排減量具關連性。 14. 建議建立方法論及推估模式，提供後續其他情境參考。並考慮加入實場實驗。 15. 建議能評估該類型場址對於整體碳排的貢獻量。		1. 謝謝委員的鼓勵與指教。 2. 謝謝委員的鼓勵與指教，後續實驗會建立其推估模式及其方法，如有適合場址將申請實場測試。 3. 謝謝委員的指教，後續實驗會評估該類型場址對於整體碳排的貢獻。	



<p>委員四</p> <p>15. 附件 1-9，針對本研究採用塑膠桶模擬砂箱，並測量翻動整治將產生之溫室氣體排放，考量土壤內原先即含有部分有機質及微生物存在，其於一般情境下仍將有二氧化碳產生，建議應設計空白試驗並可針對土壤原料進行成分分析，以利提升計畫之完整性。</p> <p>16. 附件 1-10，有關本計畫研究方法之實驗參數設計，其樣品來源、土壤含水率及各類油品濃度之配置等，應有相關參考資料輔以說明，建議應補充以利相關單位瞭解本計畫執行之合理性。</p> <p>17. 附件 1-10，有關本計畫之實驗設計內容，其採用砂箱建構模擬環境並於期間內定時予以翻土，建議該實驗執行中應確保模擬環境之完整性以避免氣體洩漏造成數據失真之情形。</p> <p>18. 附件 1-11，針對本計畫欲其執行工項步驟五，敘述將針對各類油品土壤污染整治之防治設備提出建議，該建議是否有具體作法或相關研究執行成果作為其依據，建議宜補充之。</p> <p>19. 附件 1-14，針對本計畫目前執行進度及已獲之研究成果敘述中，已完成各類油品於室溫下之溫室氣體逸散濃度試驗，建議宜補充相關實驗設計內容，以供相關單位參考。</p>	<p>1. 謝謝委員的指教，本團隊依建議內容執行相關實驗及分析。</p> <p>2. 謝謝委員的指教，本計畫研究方法之實驗參數設計，其樣品來源、土壤含水率及各類油品濃度之配置等，已於研究方法及步驟中加以補充及註明文獻來源。</p> <p>3. 謝謝委員的指教，會確保模擬環境之完整性及避免氣體洩漏為目標。</p> <p>4. 謝謝委員的指教，將依照委員建議，將各類油品土壤污染整治之防治設備提出建議並納入期中報告中。</p> <p>5. 謝謝委員的指教，相關實驗內容已補充於申請計畫書中(P8-13~8-16)。</p>
<p>委員五</p> <p>15. 以 GC/FID column 是否足以鑑別不同碳數外，有無以 GC/MS 分析特定化合物的規劃。</p> <p>16. 如何將研究成果提供場址整治，用來減低油氣逸散是工程施作上的困難的議題。</p>	<p>1. 謝謝委員的指教，目前使用 GC/FID column 並搭配碳數之標準品是可以鑑別出不同碳數，以及目前有使用常見土壤與地下水中之污染物純物質來判斷其出峰位置，目前因儀器限制，並無使用 GC/MS 的規劃。</p> <p>2. 謝謝委員的鼓勵與指教，本研究之結果將</p>



	可提供未來實場整治時空氣污染物逸散特徵參考，亦會蒐集文獻提出合理可行之防制策略。
<p>委員六</p> <p>3. 計畫書中說明：“…研究受油品污染之土壤逸散之氣體特徵及估算其碳排放係數，研究受油品污染土壤之空氣污染物特性，了解土壤中揮發性氣體逸散到大氣中的濃度，可供後續評估這些逸散氣體對環境和人類健康的影響…”</p> <p>4. 建議評估新鮮油品與風化油品(尤其是菌蝕嚴重)的異同</p> <p>5. 建議參考中油煉製所的研究成果。</p>	<p>1. 謝謝委員的鼓勵與指教，</p> <p>2. 謝謝委員的指教，會在後續實驗中比較新鮮油品與風化油品之差異並呈現於計畫書中。</p> <p>3. 謝謝委員的指教，將參考中油煉油廠之結果並納入期中報告書中。</p>



112 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號：

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案技術編碼	LAB - R - I - C2 - C (如非實驗性質含氣溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件 1-4)	
專案類別(單選)	<input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型		研究主題	<input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 政策類或其他	
申請機構系所	國立中山大學/環境工程研究所				
機構地址	高雄市鼓山區蓮海路 70 號中山大學環工所				
專案主持人	彭 彥 彬	職等/職稱	教 授		
協同主持人	陳 谷 汎	職等/職稱	教 授		
專案名稱	中文	油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究			
	英文	Investigation of characterizations of air pollutants and factor of carbon emission of the oil-contaminated soils			
	關鍵字	空氣污染,碳排放,油污染,土壤			
執行期程	自民國 112 年 12 月 15 日起至民國 113 年 11 月 29 日止				
專案主持人	姓名：彭彥彬	E-maiL: yppeng@mail.nsysu.edu.tw	專線：07-5252000#4422	手機：0930296286	
兼任人員	姓名：黃硯拓	E-maiL: ian960168@gmail.com	專線：07-5252000#4414	手機：0905151377	
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估總經費		第一年申請經費	第二年申請經費	編列說明
	1.	人事費用	416,050		(1~5 項相加之 50%為限)
	2.	設備使用含維護費	72,052		(與計畫實驗相關)
	3.	耗材與主要費用	377,948		(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	0		(含差旅與租賃費用)
	5.	行政管理費	104,950		(1~5 項相加之 15%為限)
	6.	自籌款	0		(申請單位自行籌備款項)
	申請補助經費(1~5 項)		971,000		總金額：971,000
計畫總經費(1~6 項)		971,000		總金額：971,000	

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：

日期：113.11.28



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

112 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

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"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
研究主題	<input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他		
執行機構	國立中山大學環境工程研究所	專案主持人	彭彥彬 教授
專案名稱	油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 成果		

二、成果績效自評表：「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欄位中。

(一) 學術面

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
項目							
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				
		(2)國際研討會 論文發表					
	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					
	7.技術獎項(項數)						
B 人才 培育	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	3		3		
		(2)博士					
	9.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中 心					



目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
項目							
		(4)形成實驗室					
10.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	成果 達成數	結案後半年 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)					
C 產學研合作	6.促成合作研究	件數					
		金額(仟元)					
	7.促成投資	件數					
		投資金額(仟元)					
	8.促成取得 業界科專	件數					
業界投資金額(仟元)							
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



(三) 政策面

目標達成程度			申請預估數	期中達成數	成果達成數	結案後半年達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
項目							
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 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)						
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200 字為限)

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)
1.投稿期刊 1 篇、參與國內研討會發表論文 1 篇。 2.培育 3 名碩士生。
產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)
政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污場址管理等政策及法規研訂之參考)
1. 可提供受油污染土壤場址整治時逸散之空氣污染物特徵，供未來場址監測參考。 2. 可提供受油污染土壤場址整治時之碳排放係數，供未來輸出土壤整治技術至國外時參考。



四、主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」及「兼任人員」等類別之順序分別填寫

姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	*每月平均投入 工作日數比率(%)
主持人 彭彥彬	國立中山大學 /環境工程研究所	教授	專案主持人負責： 計畫之規劃設計、進度之控制、 追蹤、督導、數據分析判讀、諮 詢與討論、報告整理撰寫	50%
協同主持人 陳谷汎	暨南國際大學/ 土木系	特聘教授	協同主持人負責： 計畫之進度之控制、數據分析 判讀、諮詢與討論、報告整理 撰寫	30%
兼任助理 柯致宇	中山大學 /環境工程研究	碩士	協助相關實驗執行、分析	60%
兼任助理 顏彩容	中山大學/ 環境工程研究	碩士	實驗數據彙整	60%
兼任助理 黃硯拓	中山大學/ 環境工程研究	碩士	進行土壤萃取及相關實驗分析	80%



五、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

投入資源類別	數量	說明
1.自籌款	元	
2.人力	人月	
3.設備		
4.其他資源 (請自行增列)	(請自填)	



摘要

台灣受油品污染場址眾多，除了各縣市加油站及儲油槽可能造成之洩漏外，煉油廠之油品污染場址亦需要花費巨大整治量能；部分油品具有揮發性，整治過程中會形成氣體逸散至大氣中，造成空氣污染及溫室氣體排放。其中又以土地農耕法與化學氧化法屬戶外開放空間之整治法需額外關注。因此，本研究依上述三種整治方法為構想，以整治工法之操作內容，設計為田口式實驗法 L8 直交表之因子，探討受柴油品污染土壤 VOCs 逸散。此外，亦進行污染場址現場量測，計算 CO₂ 及 VOCs 排放量及探討其逸散特性。

田口實驗針對 VOCs 逸散濃度之品質特性望大分析顯示，各因子對於 VOCs 逸散之影響程度依序為：柴油濃度、含水率、灑水次數、翻土次數、灑水與翻土順序、土壤質地及氧化劑添加。實場研究結果顯示，VOCs 逸散濃度受溫度影響程度大於 CO₂，且土壤含水率較低之土壤，其溫度影響越顯著。其土壤經過翻動後之一小時內，CO₂ 逸散濃度相較於 VOCs 較穩定，VOCs 逸散濃度下降率約為 30-40%，而 CO₂ 則可維持初始值之濃度。依上述等研究成果，給予整治單位相關建議，以提升整治過程空氣污之染物逸散之控制成效。

關鍵字:土壤、油品逸散、碳排放



英文摘要

There are numerous oil-contaminated sites in Taiwan, where not only gas stations and storage tanks in various counties may cause leaks, but also oil refineries require significant remediation efforts. Some oil products are volatile, and during the remediation process, gases can escape into the atmosphere, leading to air pollution and greenhouse gas emissions. Among the remediation methods, land farming, and chemical oxidation are outdoor methods that require additional attention. Therefore, this study is designed based on the aforementioned three remediation methods, employing a Taguchi L8 orthogonal array experimental design to investigate the VOCs emissions from diesel-contaminated soil. Additionally, on-site measurements of contaminated sites are conducted to calculate CO₂ and VOCs emissions and to explore their dispersion characteristics.

The Taguchi experiment analysis of the quality characteristics regarding VOCs emissions shows that the influencing factors, in order of significance, are: diesel concentration, moisture content, frequency of watering, frequency of tilling, the sequence of watering and tilling, soil texture, and the addition of oxidants. Field study results indicate that the impact of temperature on VOCs emissions is greater than that on CO₂, and that for soils with lower moisture content, the temperature effect is more pronounced. Within one hour after tilling the soil, the CO₂ emissions are more stable compared to VOCs, with a decrease rate of VOCs emissions of approximately 30-40%, while CO₂ can maintain its initial concentration. Based on these research findings, recommendations are provided to remediation units to enhance the control of air pollutant emissions during the remediation process.

Keyword: Soil 、oil effusion 、Carbon emission



目次

第一章、前言	1
第二章、研究目的	2
第三章、文獻探討	3
3.1 油品特性、危害及常見之整治技術	3
3.2 生物復育法	4
3.3 生物堆法	5
3.4 土地農耕法	5
3.5 現地化學氧化法	6
3.6 田口實驗方法及應用介紹	8
3.6.1 工程原理	8
3.6.2 實驗之設計與流程規劃	10
3.6.3 資料統計與分析結果	12
3.7 油品污染土壤整治時可能產生空氣污染物	12
3.8 碳氫化合物於油品污染土壤整治中之逸散特性	14
3.9 二氧化碳與 VOCs 於土壤中之逸散特性	15
3.10 測量土壤揮發性氣體之密閉式靜置氣罩法	16
第四章、研究方法	18
4.1 實驗前測與分析方法之建立	18
4.2 土壤揮發性氣體檢測與實驗步驟	21
4.3 田口實驗因子及參數設計	22
4.4 過氧化氫添加量	25
4.5 土壤質地分析	25
4.6 土壤含水率分析	26
4.7 單位面積土壤之 VOCs 通量計算	27
4.8 單位面積土壤之二氧化碳排放通量計算	27
4.9 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）	28
第五章、結果與討論	29
5.1 土壤質地分析	29
5.2 田口實驗之各組 VOCs 逸散濃度比較	30
5.3 VOCs 逸散濃度之田口實驗分析結果	38
5.3.1 田口實驗因子效應與品質特性分析	41
5.3.2 田口實驗之最佳化測試	45
5.4 柴油污染場址現場量測結果	46
5.4.1 場址簡介	46



5.4.2 VOCs 與 CO ₂ 逸散特徵比較.....	49
5.4.3 VOCs 與 CO ₂ 逸散濃度之通量計算.....	53
5.4.4 場址之風化污染土於實驗室量測結果.....	55
5.5 影響受 TPH 污染土壤逸散氣體之機制探討	56
5.5.1 田口因子對 TPH 污染土壤之 VOCs 逸散機制探討	56
第六章 結論與建議	59
6.1 結論.....	59
6.2 建議.....	59
第七章、參考文獻	60



圖次

圖 3.1 典型生物堆法之建構設計圖 (U.S. EPA, 2004)	5
圖 3.2 型土地農耕法之建構設計圖 (U.S. EPA, 2004)	6
圖 3.3 穩健參數設計法	9
圖 3.4 田口實驗流程圖(李輝煌, 2004)	10
圖 3.5 HC 之揮發量與土壤溫度、翻土及降雨因子之關係	15
圖 4.1 GC/FID 分析之輕質油品 TPHG (C6-C9)檢量線	18
圖 4.2 以 GC/FID 分析之汽油液相圖譜	19
圖 4.3 以 GC/FID 分析之汽油氣相圖譜	19
圖 4.4 以 GC/FID 分析之柴油液相圖譜	19
圖 4.5 以 GC/FID 分析之柴油氣相圖譜	19
圖 4.6 油品污染土壤中常見之污染物	20
圖 4.7 土壤逸散氣體測量之氣罩設計圖	21
圖 4.8 土壤質地三角圖	26
圖 5.1 土壤質地分析	29
圖 5.2 EXP 1 與 EXP 2 之 VOCs 逸散濃度比較	31
圖 5.3 EXP 3 與 EXP 4 之 VOCs 逸散濃度比較	33
圖 5.4 EXP 5 與 EXP 6 之 VOCs 逸散濃度比較	35
圖 5.5 EXP 7 與 EXP 8 之 VOCs 逸散濃度比較	37
圖 5.6 VOCs 逸散濃度平均值分布	40
圖 5.7 VOCs 逸散濃度標準差分布	40
圖 5.8 VOCs 逸散濃度值 S/N 比分布	41
圖 5.9 VOCs 逸散濃度控制因子 S/N 比反應圖	43
圖 5.10 VOCs 逸散濃度品質特性反應圖	44
圖 5.11 碼頭污染場址土堆	47
圖 5.12 現場量測示意圖	48
圖 5.13 測量 10 分鐘期間之氣罩內 CO ₂ 濃度變化	48
圖 5.14 測量 10 分鐘期間之氣罩內 VOCs 濃度變化	48
圖 5.15 測量期間之場址氣溫	49
圖 5.16 測量 10 分鐘期間氣罩內之 VOCs 濃度值統計	50
圖 5.17 測量 10 分鐘期間氣罩內之 CO ₂ 濃度值統計	50
圖 5.18 受翻土影響之 VOCs 濃度變化趨勢	51
圖 5.19 受翻土影響之 CO ₂ 濃度變化趨勢	52
圖 5.20 場址之風化土於實驗室進行量測	55
圖 5.21 生物堆之土壤深度與 NAPL 濃度關係圖	57



表次

表 3.1 用氧化劑之反應物型態、穩定性與技術發展程度彙整	7
表 3.2 常見氧化還原反應及其氧化電位	8
表 3.3 L ₈ (2 ⁷) 直交表	11
表 4.1 土壤逸散氣體量測實驗控制因子水準表	22
表 4.2 土壤逸散氣體量測實驗 L ₈ 直交表	23
表 4.3 台灣區域土壤含水率觀測網之建置與資料分析	24
表 4.4 研究計畫甘特圖	28
表 5.1 土壤質地分析	29
表 5.2 EXP 1 與 EXP 2 之田口因子及參數對照表	30
表 5.3 EXP 1 之 VOCs 逸散濃度實驗數據	30
表 5.4 EXP 2 之 VOCs 逸散濃度實驗數據	31
表 5.5 EXP 3 與 EXP 4 之田口因子及參數對照表	32
表 5.6 EXP 3 之 VOCs 逸散濃度實驗數據	32
表 5.7 EXP 4 之 VOCs 逸散濃度實驗數據	32
表 5.8 EXP 5 與 EXP 6 之田口因子及參數對照表	34
表 5.9 EXP 5 之 VOCs 逸散濃度實驗數據	34
表 5.10 EXP 6 之 VOCs 逸散濃度實驗數據	34
表 5.11 EXP 7 與 EXP 8 之田口因子及參數對照表	36
表 5.12 EXP 7 之 VOCs 逸散濃度實驗數據	36
表 5.13 EXP 8 之 VOCs 逸散濃度實驗數據	36
表 5.14 VOCs 逸散濃度之田口實驗表	38
表 5.15 VOCs 平均逸散濃度結果與 S/N 比	39
表 5.16 VOCs 逸散濃度 S/N 比反應表	43
表 5.17 VOCs 逸散濃度品質特性反應表	44
表 5.18 田口實驗之最佳化測試	45
表 5.19 污染場址土壤基本資訊	46
表 5.20 VOCs 排放通量計算結果	53
表 5.21 CO ₂ 排放通量計算結果	54



第一章、前言

工業快速發展，使廢棄物在製造、輸送及儲存，工廠之原料、產品及與處置的過程中污染土壤與地下水的機會大為增加，使得人體暴露在有危害潛勢之環境，主要的污染源包括地下或地上石油產品儲存槽、生產設備，以及與石油運輸和加工相關的設施，這些地點經常發生石油洩漏、洩漏或排放，導致土壤、地下水、空氣和水體嚴重污染。根據台灣經濟部能源局油價資訊管理與分析系統的統計，至目前(2022 年)為止，台灣的加油站總數量為 2,483 間，8,000 座以上的地下儲油槽(中國石油股份有限公司，2022)，大型儲油槽及加油站的管線大都埋設於地下，常因管線腐蝕、年老失修、操作不當等人為或非人為因素，造成管線或儲槽破損，使油品洩漏並滲透到地下，對環境及人體造成潛在危害，這些工廠的運作對當地環境產生了嚴重的負面影響。包括地下水和土壤污染、空氣品質惡化、對水體生態系統的破壞，對居民和附近農田的健康和經濟影響。根據美國賓州環境資源部的研究(Pennsylvania Department of Environmental Resources)，埋設十年以上的儲油槽有 46% 會發生洩漏，而埋設十五年以上者，其洩漏機率更高達 71%。此外，中油高雄廠為我國南部規模最大的油品污染廠址，中油高雄廠於 104 年 12 月關廠停止運作並進行設備拆遷作業，目前中油高雄廠的廠內、外共計有 15 處公告污染場址，其廠區面積約 252 公頃，製程區面積約 177 公頃，公告列管面積約 176.7 公頃，其主要土壤及地下水污染物為苯、甲苯、乙苯、二甲苯，以及總石油碳氫化合物(以下簡稱 TPH)等。



第二章、研究目的

台灣受油品污染場址眾多，除了各縣市加油站及儲油槽可能造成之洩漏外，煉油廠之油品污染場址亦需要花費巨大整治量能；部分油品具有揮發性，整治過程中會形成氣體逸散至大氣中，產生空氣污染及溫室氣體。本計畫之首要目標即為研究受油品污染之土壤逸散之氣體特徵及估算其碳排放量，研究油品污染土壤之空氣污染物特性，其中又以生物堆法、土地農耕法與化學氧化法屬戶外開放空間之非現地整治法需額外關注。因此，本研究以上述三種整治方法為構想，設計相關操作因子，來模擬在進行整治時之土壤中揮發性氣體逸散到大氣中的特性，可供後續評估這些氣體逸散特徵與對環境和人類健康的影響，以及整治過程之空氣污染防制因應措施提供有效建議。



第三章、文獻探討

3.1 油品特性、危害及常見之整治技術

TPH 為一化學混合物，所有的組成化學物主要由碳及氫(又稱碳氫化合物)所構成。科學家將 TPH 依其於土壤或水中之反應將相似反應者歸類成一群，共可分作許多石油碳氫化合物群。每群中皆由許多個別化學物質所組成，汽油主要由碳數較低的烷烴、改質烴和芳香烴組成，通常在 6 至 12 的碳數範圍內。汽油分子之碳數分佈通常為低碳數(C6-C9)，因此易於在高溫和高壓下快速燃燒，汽油所包含之碳氫化合物多為複雜混合物，如：苯、甲苯、乙苯和二甲苯 (BTEX)，這些物種在水中的溶解度較大，因此在污染事件中對環境影響最大，並且容易進入土壤(Santos et al., 2018)；汽油的污染主要來自有害氣體排放，如一氧化碳 (CO) 和氮氧化物 (NO_x)，以及揮發性有機化合物 (VOCs)，這些污染物對空氣品質有不良影響，導致大氣污染和健康問題，如呼吸困難和皮膚刺激。柴油(diesel)為由原油中蒸餾出來的重質碳氫化合物，其組成大約含 30%的直鏈烷類(n-alkanes)、45%的烷類異構物和環烷類(iso-and cycloalkanes)，以及 24%芳香族碳氫化合物(aromatic hydrocarbons)，另外還有極少量的硫化物、氮化物、異戊二化合物(isoprenoids)及氧化物等，碳數含量約為 C9 至 C28，比重約在 0.81 至 0.87，十六烷值在 45 以上，動力粘度在 40 °C 為 1.7~4.1 cSt，凝固點約為 -20.5°C，沸點約 180 至 370°C，在一般狀態下，具有不容易揮發之特性，為半揮發性有機化合物(Calabrese et al., 1988)。潤滑油的碳數分佈較廣泛，通常在 20 至 50 以上。它們用於機械設備的潤滑，以減少磨損並確保機械運轉平穩。潤滑油在使用過程中可能被污染，這些潤滑油包括重金屬、多環芳香烴 (PAHs) 和其他有害物質(Kuppusamy et al., 2020)，如果潤滑油未妥善處理，可能導致土壤和地下水的污染，對生態系統和健康構成風險。國際癌症研究中心(International Agency for Research on Cancer, IARC)將一總石油碳氫化合物複合物(苯)分類為對人類具致癌性的物質。並將其他總石油碳氫化合物複合物(苯芘及汽油)歸類成可能具人類致癌性之物質。而大部分其他的總石油碳氫化合物之複合物針對其對人類之致癌性則被視為不可分類。而上述所有油品之常見的處理方法有以下幾種，包括熱處理、氧化劑氧化、溶劑脫附及生物處理等方法。介面活性劑淋洗方面，國內章日行老師團隊曾以以高溫方式進行柴油污染物之去除，實驗參數包括萃取溶劑、處理溫度、土壤粒徑大小等，結果顯示萃取溶劑以二氯甲烷表現最佳，當處理溫度達 300 度時，其去除率可達 90%以上，土壤粒徑越小時去



除率越高(蔡右容, 2020)。而在汽油污染土壤處理技術方面 Richard 等人利用改良芬頓反應對汽油中代表性芳香族和脂肪族碳氫化合物的相對氧化進行了評估，其使用改良芬頓試劑（催化過氧化氫）對受石油污染的土壤和地下水進行基於風險的處理提供了基礎。汽油中的芳香族成分被認為比脂肪族餾分更危險，因為它們在地下的流動性更高，並且具有更高的急性和慢性毒性，結果顯示與脂肪族餾分相比，毒性更大、流動性更強的芳香族餾分使用更少的 H_2O_2 和更經濟的條件（包括接近中性的 pH 值）可以更有效地氧化，當使用改良芬頓試劑處理受污染的土壤和地下水時，基於僅處理石油芳烴餾分的製程設計可以顯著降低成本(Watts et al., 2000)。而在處理潤滑油之污染土壤時 Mohammad 等人使用亞臨界水萃取對潤滑油污染土壤的整治，透過進行八次單獨的萃取並在不同的時間中改變亞臨界水溫（200、225、250 和 275 °C）和萃取時間（90、120、180 和 240 分鐘）研究了溫度和時間對萃取效率的影響，潤滑油由於與基質的強烈相互作用而極難去除。此項研究發現使用亞臨界水作為溶劑，在定量整治被潤滑油污染的土壤方面具有很高的可行性。萃取影響參數的結果顯示，潤滑油從土壤中的萃取依賴於溫度和時間，經由一階吸附動力學模型很好地解釋潤滑油在較長萃取時間下的萃取效率。對兩種 SCWE 模式（動態和靜態-動態）進行比較，顯示靜態-動態模式下 TPH 的萃取效率幾乎為 100%，而相同條件下動態模式萃取的 TPH 萃取效率僅為 52%。因此，此研究開發之技術使用亞臨界水可以從土壤中提取 >99% 的潤滑油(Islam et al., 2014)。

3.2 生物復育法

生物復育是一經由管理或自然發生的過程中，以微生物將污染物降解或轉移成較低毒性或無毒性的型態，藉此降低或排除環境污染物。生物復育進行時，微生物需利用營養鹽及碳源提供其生存及成長之需求。當現地生物復育進行時，土壤及底泥中提供了分解污染物之微生物來源及微生物生長之營養基質，但並非每個場址的狀況皆如此良好。非現地的生物復育則往往需要建立一生物反應槽，並於反應槽中進行微生物的培養，用以去除污染物。微生物轉化有機物的程序大致可分為降解(degradation)、礦化(mineralization)、去毒(detoxification)及活化(activation)等作用。當最初的化合物消失時，即為降解。礦化是指將有機物完全轉化成 CO_2 、 H_2O 或 Cl^- 等無機型態的物質。去毒則是指將化合物轉換成較低毒性或不具毒性之中間產物。而活化是指形成毒性中間產物或毒性最終產物的過程。微生物分



解毒性物質的機制包括有脫氯(dechlorination)、水解(hydrolysis)、斷鍵(cleavage)、氧化(oxidation)、還原(reduction)、脫氫(dehydrogenation)及取代(substitution)等。許多存在於環境中的有機污染物可在好氧或厭氧狀態下被微生物分解。在生化的氧化還原反應中，污染物可被當作電子供給者或電子受者進行利用。當存在足夠的氧氣(好氧狀態下)及營養鹽時，微生物最終將轉換有機污染物成為二氧化碳、水及微生物細胞。

3.3 生物堆法

生物堆法與土耕法十分類似，主要流程為污染土壤經開挖並堆積後，打入空氣於土堆中，並適當補充養分及水分，使土壤中之好氧性微生物增強活性並對污染物行分解作用。其不同之處為，土地農耕法界油耕犁或翻土而獲得氧氣，並有更好的攪拌效果，而生物堆法則藉由強制送風或多孔管來獲得氧氣。

油品碳氫化合物之生物堆法，視油品種類及揮發性程度不同而有所差異。最易揮發之油品(如:汽油)藉由土壤通氣，再經由適當之物裡吸附或生物濾床處理，即可達到目的；較不具揮發性之油品(如:柴油、煤油等)再生物堆時不具揮發性，主要機制微生物降解。但高分子量之油品如重油及潤滑油，需較長時間之生物降解。圖 3-1 為典型生物堆法之建構設計圖。

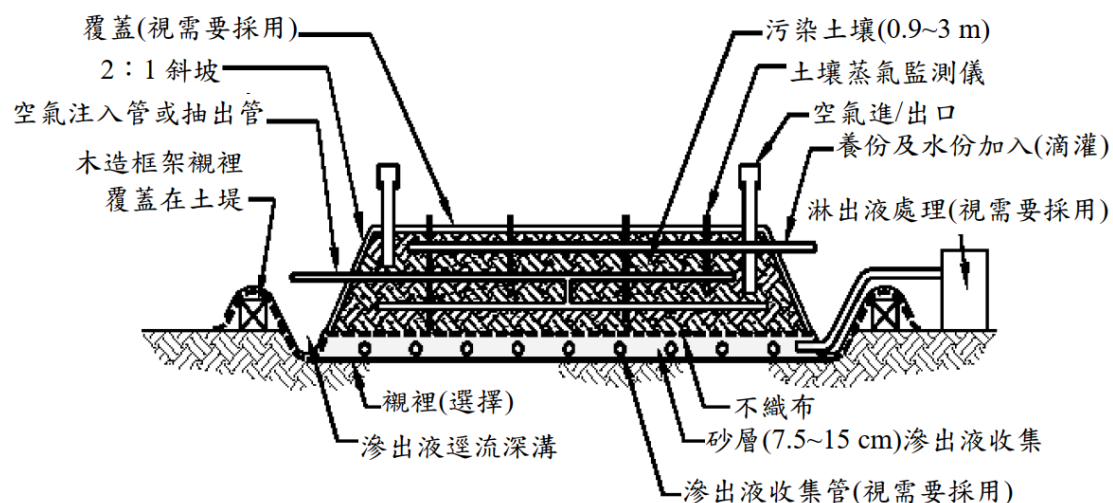


圖 3.1 典型生物堆法之建構設計圖 (U.S. EPA, 2004)

3.4 土地農耕法

土地農耕法亦可稱田間處理法，其原理與生物堆肥相似，但此項技術



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

涵蓋翻動表層土壤提高土壤中通氣性，並添加營養源與水分，促進微生物對油品碳氫化合物之生物分解能力。若污染土壤深度在九十公分內者不需開挖，若大於一百五十公分者，需開挖至土壤表層。

土耕法以有效證實可有效去除地下儲油槽污染場址之油品碳氫化合物，但根據不同油品種類及揮發性程度有不同處理方式。以圖 3-2 為典型之土地農耕建構設計圖。

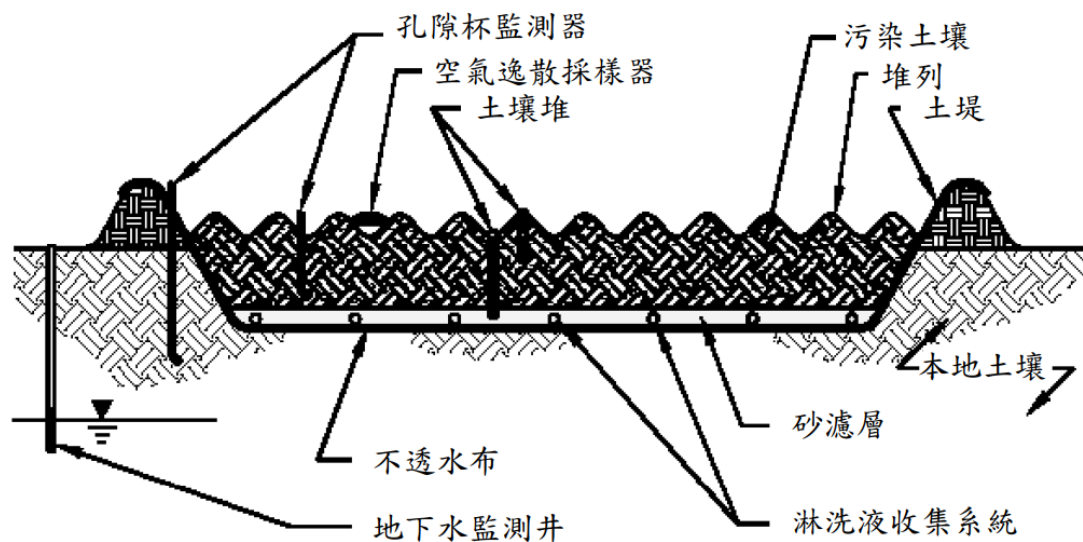


圖 3.2 型土地農耕法之建構設計圖 (U.S. EPA, 2004)

土耕法結合生物堆法之方式亦於實務上進行土壤復育整治，其處理流程摘要如下：

- (1) 復育操作前污染土壤進行 TPH 濃度分析，分析項目包括土壤污染管制項目之苯、甲苯、乙苯、二甲苯、總石油碳氫化合物等，並加測甲基第三丁基醚(MTBE)。
- (2) 分析污染土壤之碳源與營養鹽比例，決定是否添加營養劑或生物製劑。
- (3) 定期以怪手或耕犁機翻堆土壤，使其氧氣充足，以達到好養處理效果，每週翻動 1 次置 2 次，翻堆方式為上下翻動，以提高土壤之均勻性。
- (4) 定期灑水添加水分(每天自東噴灑 1-2 小時)，控制土壤中含水量，介於 15%-30%之間。
- (5) 每月一次進行土壤化學及生物總菌落數特性監測，pH 值、氮含量、總有機碳磷、土壤氣體中之 CO_2 、 O_2 、 CH_4 、 H_2S 等。
- (6) 處理中定期進行檢測 TPH 濃度，評估整治效能。

3.5 現地化學氧化法



第三章、文獻探討

現地化學氧化法係將氧化劑注入或摻進地下環境中，使地下水與土壤中的污染物破壞、降解成較不具危害性的物質，理想狀況下，可轉化成二氧化碳、水與無機鹽類，但亦可能產生有毒的中間副產物。較常用的氧化劑種類有高錳酸鹽(MnO_4^-)、Fenton 試劑(過氧化氫+鐵離子， $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$)、臭氧(O_3)及過硫酸鹽($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$)等 4 種，其反應物型態、穩定性、技術發展程度與氧化能力彙整如表 1 所示。氧化劑可藉由注入井與抽水井配置所形成的水力坡降，控制其在地下水中的傳輸。氧化劑之氧化電位愈高，氧化力愈強，愈易將有機污染物完全分解、礦化(mineralization)，各種氧化劑之反應特性如表 3.1 所示，其氧化還原反應如表 3.2 所式。

表 3.1 用氧化劑之反應物型態、穩定性與技術發展程度彙整

氧化劑	反應物	反應物型態	藥劑持久性*	技術發展程度
高錳酸鹽	MnO_4^-	粉末、液態	>3 個月	發展中 (developing)
Fenton 試劑	$\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{HO}_2$ 、 HO_2^-	液態	數分至數小時	已應用於實場
臭氧	O_3 、 $\cdot\text{OH}$	氣態	數分至數小時	實驗性/新興技術
過硫酸鹽	$\cdot\text{SO}_4^{2-}$	粉末、液態	數小時至數週	已應用於實場



表 3.2 常見氧化還原反應及其氧化電位

氧化還原反應	電位(Eh)
過錳酸鹽	
$\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.7 V (過錳酸根)
Fenton 試劑	
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.8 V (過氧化氫, H_2O_2)
$2\cdot\text{OH} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	2.8 V (氫氧自由基, $\cdot\text{OH}$)
$\cdot\text{HO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.7 V (過氫氧自由基, $\cdot\text{HO}_2$)
$\cdot\text{O}_2^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	-2.4 V (過氧化物自由基, $\cdot\text{O}_2^-$)
$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{OH}^-$	-0.88 V (過氧化氫陰離子, HO_2^-)
臭氧	
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2.1 V (臭氧)
$2\text{O}_3^- + 2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 4\text{O}_2 + 2\cdot\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	2.8 V (氫氧自由基, $\cdot\text{OH}$)
過硫酸鹽	
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$	2.1 V (過硫酸根, $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$)
$\cdot\text{SO}_4^{2-} + \text{e}^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$	2.6 V (硫酸根自由基, $\cdot\text{SO}_4^{2-}$)

3.6 田口實驗方法及應用介紹

3.6.1 工程原理

田口品質工程方法為使用直交表之方式進行次數較少的實驗，即可得到與原始實驗流程類似的結論，因此，本研究選擇以田口實驗方法來進行萃取溶劑之實驗，並以綠色溶劑代替傳統溶劑的方式找出最佳萃取率之實驗。

田口博士所發明之田口實驗為產品穩健性以影響最終產品的製造成本最低，使得在技術、產品和製造性能上的狀態為最理想，而此工程系統在設計或研發上面由三個步驟所組成，系統設計、參數設計以及公差設計，系統設計方面為工程師在目前現有之技術上及市場有關之模組最一系列的系統整合，以達到產品或是製程上之需求，在參數設計方面，待系統設計結束後其參數須作更進一步之判定，工程師在決定這些參數的過程稱為參數設計，其目標是用來決定設計之參數，讓其達到理想系統機能以實現品質損失最小化，而最後之公差設計則是經過一系列的過程之後，最終需



第三章、文獻探討

要再更進一步縮小其差異時，換句話說意即提高品質，即可通過調整系統參數之公差值，來達到縮小品質損失。而田口法所使用之正交列的設計就可以通過少量的實驗來達到觀測上述步驟來去計算實驗值和期望值之間的偏差，田口博士則推薦使用損失函數來去觀察偏離期望值的性能，再將此值轉換為信號雜訊比(Signal to noise, S/N 比)。

而在品質特性及理想機能中，會對品質特性產生影響之因子分為信號因子(Signal factors)、控制因子(Control factors)以及干擾因子(Noise factors)，信號因子之變動範圍通常會考慮此實驗所能達到之最大範圍，干擾因子是屬於會影響品質特性進而使其產生變異的因子，因此高品質的意義為品質穩健意即干擾因子影響很小，田口法又稱為穩健品質設計法，穩健參數設計法如圖 3.3 所示，理想機能分為三種，望小、望目和望大(李輝煌, 2004)。

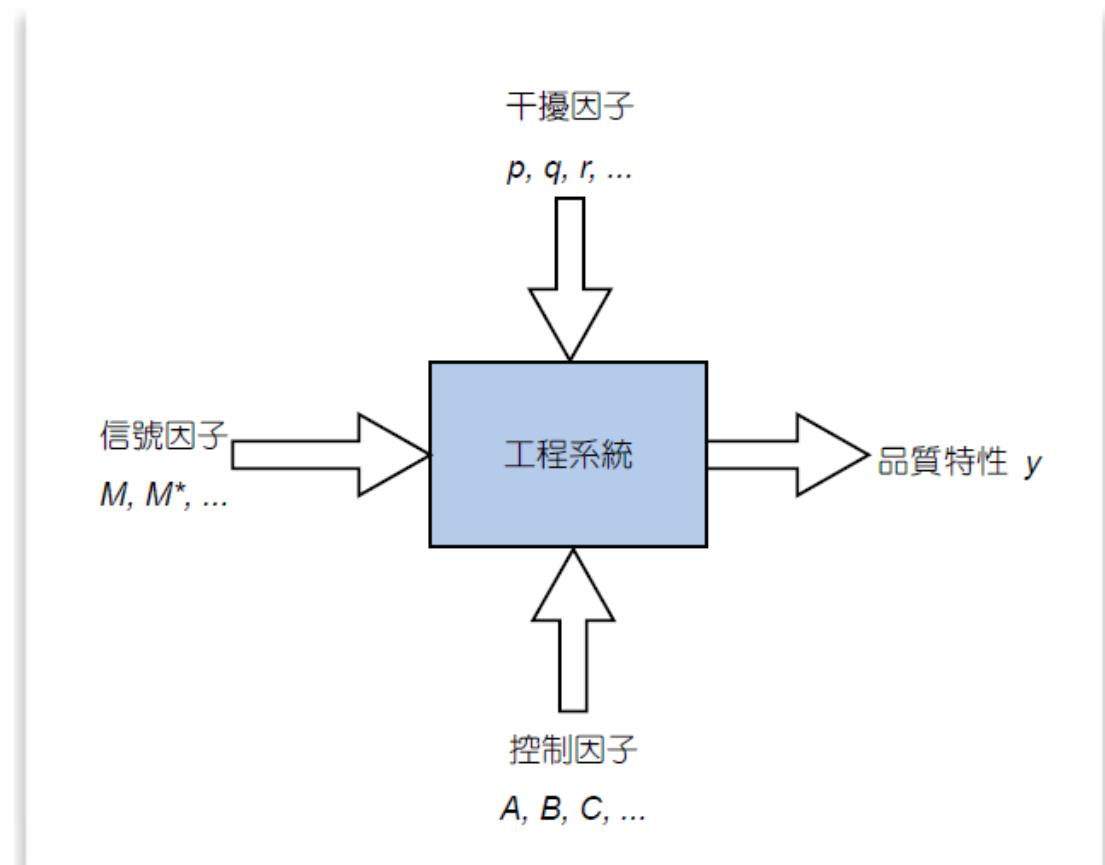


圖 3.3 穩健參數設計法



3.6.2 實驗之設計與流程規劃

田口實驗步驟如圖 3.4 所示。

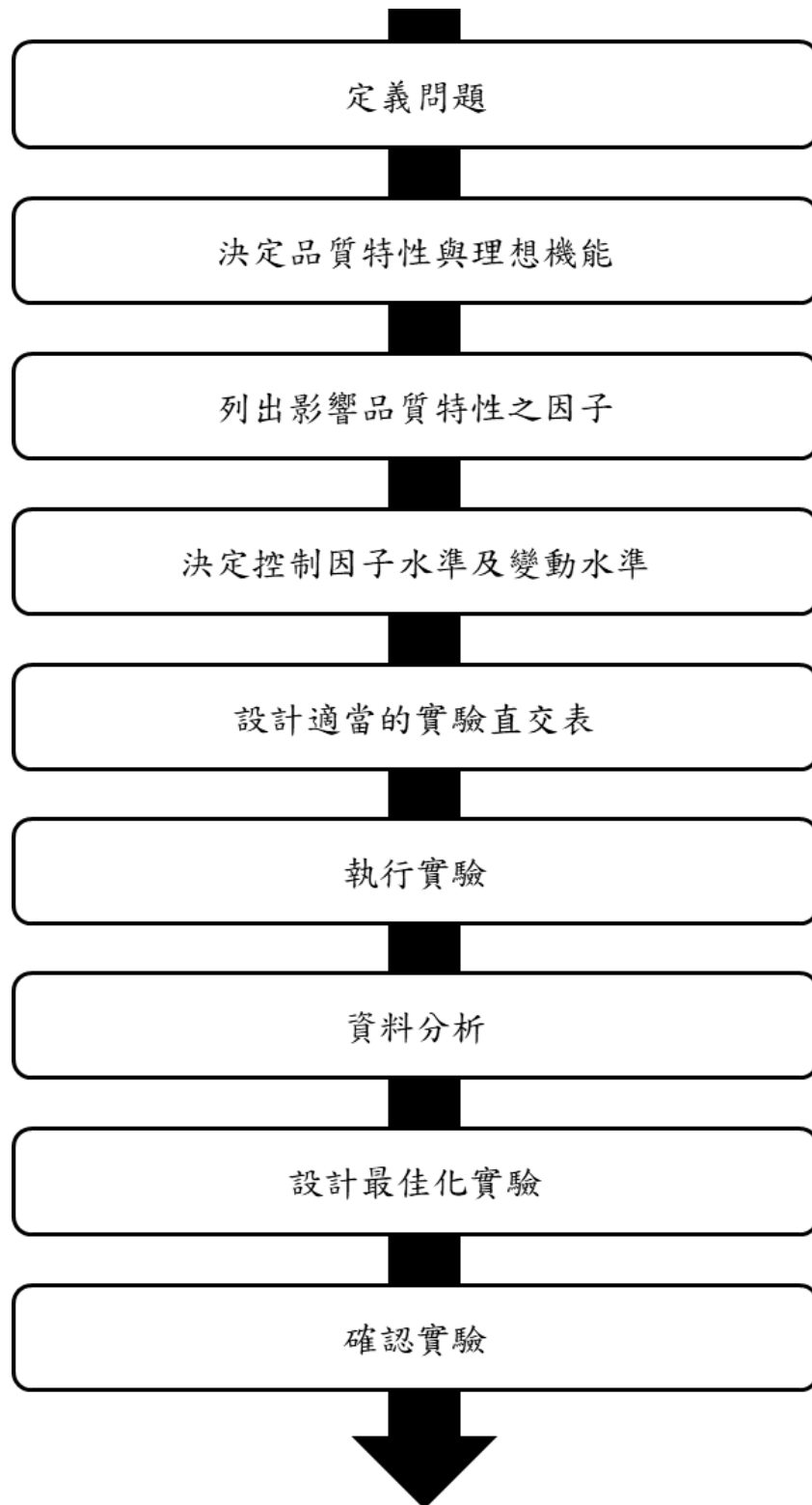


圖 3.4 田口實驗流程图(李輝煌, 2004)



第三章、文獻探討

研究初期依據所選之問題決定其因子，找出影響實驗結果之因子，並根據所選之控制因子的數量來搭配適當之直交表，田口直交表之命名方式以 $L_a(b^c)$ 來命名，各個直交表所能容許之水準因子也不同，本研究所使用之 L_8 直交表(2^7)，直交表設計如表 3.5 所示，如果 7 個控制因子所有變動水準的組合都要做實驗的話，則一共需要 128 (2^7) 次實驗。利用了田口博士所設計之 L_8 直交表，只須進行 8 組實驗。

表 3.3 $L_8(2^7)$ 直交表

Exp	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2



3.6.3 資料統計與分析結果

1. 望大特性(Lager-the-better)

當品質特性 y 越大目標值越大越好，望大特性。S/N 比計算公式如下：

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n}$$

2. 望小特性(smaller-the-better)

當品質特性的 y 越小時其品質特性越佳，為望小特性。S/N 比計算公式如下：

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}$$

3. 望目特性(nominal-the-best)

望目特性的目標為特定值，當品質特性 y 有理想目標時，越接近緋值越佳。S/N 比計算公式如下：

$$\eta = 10 \times \log \frac{\frac{1}{n}(S_m - V_e)}{V_e}$$

其中

$$S_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \quad V_e = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - S_m}{n-1}$$

利用上述之算式來計算目標特性之數據，來製作出品質特性表及品質特性反應圖，後確認實驗即可。

3.7 油品污染土壤整治時可能產生空氣污染物

在整治受石油污染的土壤時，各種人為或自然活動都可能將污染物釋放到大氣中。如果管理不當，這些污染物可能會帶來健康和環境風險。以下是石油污染土壤整治過程中可能產生的一些空氣污染物：

1. 揮發性有機化合物 (VOC)：VOC 是一種容易蒸發到空氣中的化學物質，當受污染的土壤被挖掘和擾動時，土壤中存在的揮發性有機化合物可



能會釋放出來。與石油污染相關的一些常見 VOC 包括脂肪族化合物、萘、苯、甲苯、乙苯和二甲苯 (BTEX)等，根據先前研究調查土壤中之各種 VOC 之濃度分別為苯 11.1 $\mu\text{g/L}$ 、萘 25 $\mu\text{g/L}$ 、甲苯 75 $\mu\text{g/L}$ 、二甲苯 100 $\mu\text{g/L}$ 以及甲基三級丁基醚(MTBE)22.2 $\mu\text{g/L}$ (Liu et al., 2015)。此外，VOC 會與 NOX 行光化學反應產生臭氧，影響空氣品質。

2. 懸浮微粒 (PM): 由懸浮在空氣中的微小固體或液體顆粒組成。在挖掘、運輸和處理受污染土壤的過程中，灰塵顆粒可能會懸浮在空氣中。細懸浮微粒 (PM_{2.5}) 和懸浮微粒 (PM₁₀) 可能會產生並被吸入，可能導致呼吸問題。

3. 溫室氣體: 一些受石油污染的土壤整治技術，例如熱脫附(Yi et al., 2016)，可能會將二氧化碳 (CO₂) 等溫室氣體釋放到大氣中。土壤的溫室氣體排放量有很大差異，從 $3.1 \times 10^{-7} \text{t}$ 到 8.2 t CO₂-eq/m³ 不等。焚燒的平均溫室氣體排放量最高 (0.7t CO₂-eq/m³)，熱解吸最低 (0.07t CO₂-eq/m³)。研究也發現，異地開挖處置法土壤處理技術的溫室氣體排放量變化範圍較大，處理土壤的溫室氣體排放量為 $3.1 \times 10^{-7} \text{t}$ 至 8.2 t CO₂-eq/m³ (Amponsah et al., 2018)。用於挖掘的重型機械中燃料的燃燒也會導致二氧化碳排放。此外，根據 Ausma 等人研究顯示，翻動土壤會導致二氧化碳排放量短時間內暴增的現象(Ausma, 2001)。

4. 有毒氣體: 根據污染的種類和程度，土壤可能含有有毒氣體，例如硫化氫 (H₂S) 或甲烷 (CH₄) (Seo and Cho, 2021)，主要是土壤在厭氧條件下分解有機物時產生。釋放這些氣體，對工人和附近社區帶來風險。

5. 氮氧化物 (NO_x): 整治過程中使用的燃燒設備，例如柴油發電機或焚化爐，會產生氮氧化物 (NO_x)，此為導致煙霧和呼吸問題的空氣污染物之一；台灣中油煉油廠之空氣污染改善項目中亦曾提及，在污染場址氣體中主要之氮氧化物 2021 年測得為 2948.4 ton，2022 年則為 2938.1 ton (台灣中油煉化廠排放量統計)。此外，氧化亞氮的產生主要受到土壤中硝化作用及脫氮作用控制，為溫室氣體之一。

6. 多環芳烴 (PAHs): 絕大多數有機化合物和副產品都是石油烴污染物，由於其持久性和頑固性，這些污染物被列為重點環境污染物，例如多環芳烴 (PAH)可以在環境中長久存在，並且不易降解(Ossai et al., 2020)，在焚燒等整治技術中 PAHs 可能會釋放到空氣中，PAHs 是已知對健康有害且多數為致癌物的有毒有機化合物(Naik and Duraphe, 2012)。在油品污染土壤整治過程中，必須採取適當的排放控制措施，盡量減少這些處理過程中所產生之空氣污染物的排放，而如若 PAHs 污染物進入人體肺、肝、腎等器



官，達到一定劑量，就會影響器官的正常功能，甚至致癌。同時，石油污染物不僅能在植物體內產生累積效應，還可以透過食物鏈效應在人和動物體內富集，危害人畜健康，引發癌症等疾病(Iv et al., 2022)。

3.8 碳氫化合物於油品污染土壤整治中之逸散特性

碳氫化合物於生物修復期間的土壤損失機制包括非生物物理過程如揮發和浸出。土壤基質中的 HC 會限制 HC 的可用性微生物的生物降解和揮發浸出。這些過程有助於減少土壤中的總碳氫化合物 (THC) 濃度和 HC 整體成分的變化。流動性和土壤中 HC 的有效性取決於物理和土壤和存在的碳氫化合物的化學性質。

釋放大氣中的碳氫化合物的重要性從分佈到土壤上的石油產品中得到認可在文獻和石油工業中，需要提高有關機制的知識，決定土壤污染物之揮發程度，因污染的土壤可能對區域空氣造成影響透過在城市地區產生地面臭氧 (O_3)。此外，加拿大和加拿大的政府機構美國一直在實施指導方針針對排放物之捕集和收集等處理措施。輕質成分含量高，例如石油餾分汽油和煤油中含有的化合物，特別容易揮發(Ausma, Edwards et al., 2002)。

依圖 3.5 之研究結果顯示，由於農地耕作和氣溫升高，HC 排放量增加。若發生降雨，因土壤溫度下降，及土壤孔隙率降低，導致 HC 揮發量較低。此外，圖 3.6 顯示研究 2 經整治數個月後，低碳數的化合物透過生物和非生物過程從污染土壤中去除的速度比高碳數的化合物更快，其揮發扮演關鍵作用。

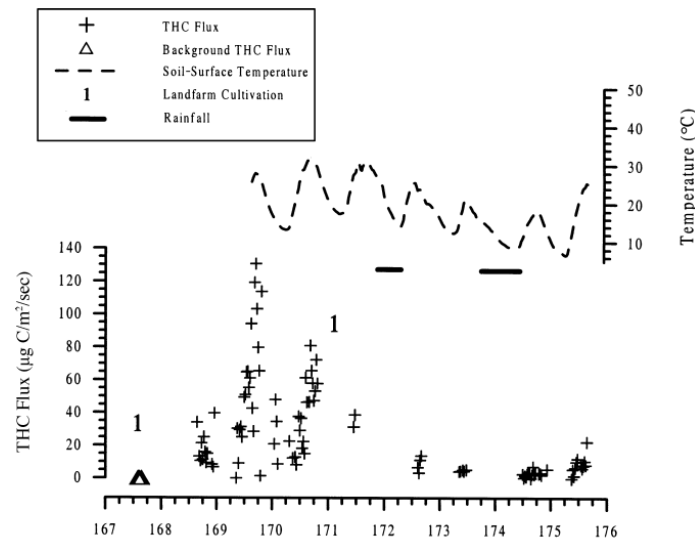


圖 3.5 HC 之揮發量與土壤溫度、翻土及降雨因子之關係

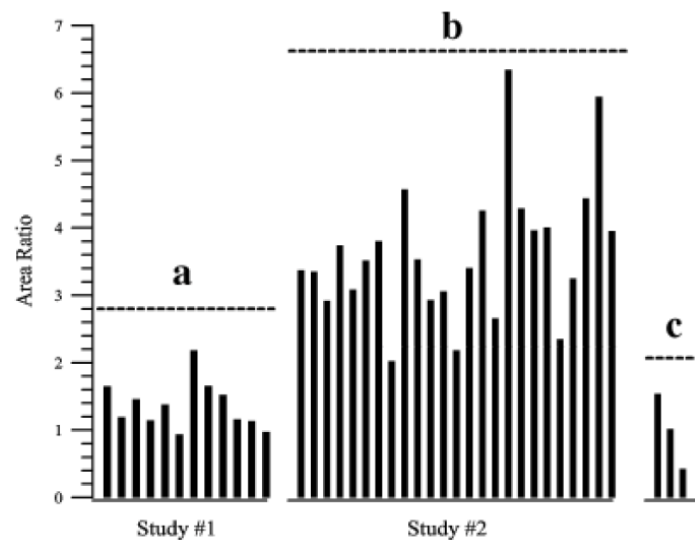


圖 3.6 經數個月整治後之重質化物和物與輕質化合物之比例比較

3.9 二氧化碳與 VOCs 於土壤中之逸散特性

當乾燥的土壤被再潤濕時，微生物產生的 CO_2 快速增加被廣泛觀察到 (Birch, 1958 ; Bloem et al., 1992 ; Cui & Caldwell, 1997 ; Fierer & Schimel, 2002 ; Franzluebbers et al., 2000)。這種現象被稱為“Birch 效應”，在現場 (e.g., Cui & Caldwell, 1997) 和實驗室 (e.g., Franzluebbers et al., 2000) 都有記錄。Birch 效應的強度和持續時間取決於土壤類型 (Huxman et al., 2004 ; Waring & Powers, 2016)、溫度 (Borken et al., 2003) 和濕度條件 (Lado-Monserrat et al., 2014 ; SponseLLer, 2007 ; Xiang et al., 2008)。微生物 CO_2 排放中的再潤濕脈衝歸因於再潤濕引起的不穩定土壤有機碳庫的釋放、完



整細胞對微生物滲透調節劑的快速分解代謝或滲透休克導致的微生物細胞裂解 (Adu & Oades, 1978; Appel, 1998; Jenerette & Chatterjee, 2012; Moyano et al., 2013; Vangestel et al., 2010); 在量化和預測土壤 CO₂ 排放時，特別是在頻繁發生乾燥和再潤濕事件的地區，這些與再潤濕相關的 CO₂ 脈衝非常重要 (Huxman et al., 2004; Schimel et al., 1999)。CO₂ 排放量通常在再潤濕事件後 24-48 小時內達到峰值，即使土壤濕度水平保持較高，CO₂ 排放量隨後也會下降 50-95% (Schimel et al., 2007; Wang et al., 2015; Waring, & Powers, 2016)。

很少有研究描述土壤 VOC 排放及其在土壤再潤濕時的動態。有證據指出，某些揮發性有機化合物，包括甲醇、丙酮、甲醛、乙醛和萜烯，會在土壤再潤濕時釋放出來 (Asensio et al., 2007; Schade & Goldstein, 2001; Veres et al., 2014)。土壤中排放的 VOC 的數量和類型也會隨著土壤濕度動態、土壤溫度、太陽輻照度和碳有效性的變化而變化 (Asensio et al., 2007; Bachy et al., 2018; Schade & Custer, 2004; Waring & Powers, 2016)。

3.10 測量土壤揮發性氣體之密閉式靜置氣罩法

靜置式氣罩法是一種常見的氣體採樣方法，通常用於測量空氣中的污染物濃度。這種方法的基本原理是通過將氣體樣品靜置在一個封閉的氣罩內，收集氣體樣品，然後進行分析以測量目標污染物的濃度。

以下是靜置式氣罩法的基本步驟：

1. 氣罩設置：將氣罩放置在所需測量的位置，確保其能夠完全覆蓋待測區域或目標源。
2. 樣品收集：打開氣罩並收集空氣樣品，通常使用氣體採樣泵將空氣抽入氣罩中。收集時間可以根據需要進行調整，以確保收集到足夠的樣品進行後續分析。
3. 氣罩密閉：在樣品收集結束後，密封氣罩以防止外部空氣進入。這一步驟很重要，以確保收集到的樣品代表了目標區域或源的空氣樣品。
4. 樣品分析：將收集的氣體樣品送至實驗室進行分析。分析方法通常根據目標污染物的特性而定，例如使用氣相色譜儀 (GC) 或質譜儀 (MS) 等儀器進行定量分析。
5. 濃度計算：根據分析結果計算目標污染物的濃度，通常以不同的單位表



示，如 ppm（百萬分之一）或 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （微克每立方米）等。

靜置式氣罩法通常用於測量空氣中的揮發性有機化合物（VOCs）、氣體污染物或其他氣體樣品的濃度。它是一種相對簡單且有效的氣體採樣方法，但在應用時需要考慮一些因素，如氣罩的設置位置和尺寸、樣品收集時間和收集器的選擇等。其通量計算公式以下列公式求得(Zou et al., 2004； Stadmark and Leonardson, 2005； Song et al., 2008)：

$$C_g = (V/A)(\Delta C / \Delta t)$$

其中， $C_g (\text{kg}/\text{m}^2\text{s})$ =微量氣體通量， V =氣罩內之體積(m^3)， A =氣罩覆蓋的面積(m^2)， $\Delta C (\text{kg}/\text{m}^3)$ =微量氣體濃度， $t(\text{s})$ =時間。



第四章、研究方法

4.1 實驗前測與分析方法之建立

本團隊依照 NIEA W901.50B 已完成 GC/FID 分析輕質油品 TPHG (C6-C9)揮發氣體之檢量線，其 R^2 值為 0.9967，如下圖 4.1。

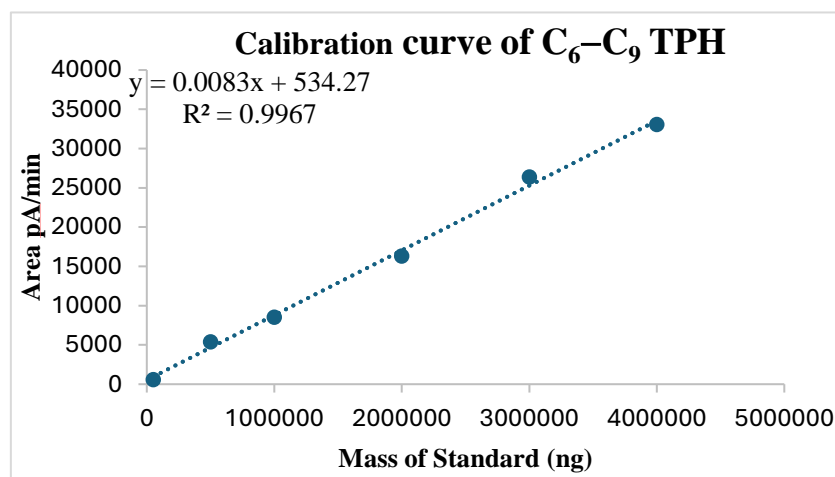


圖 4.1 GC/FID 分析之輕質油品 TPHG (C6-C9)檢量線

為了解受油品污染土壤之逸散氣體特徵，本研究團隊以 GC/FID 分析具揮發性油品汽油及柴油氣、液相圖譜，以了解揮發性物質之碳數分布，如下圖 4.2 至 4.5 所示。圖 4.2 及圖 4.3 顯示 TPH 出峰時間會依據所選之管柱有所不同，在液相時所選用之管柱為 DB-1 而氣相之圖譜選用的為 DB-624 的管柱，兩者最大的不同是其管柱之極性的特性，更能明顯觀察到 TPH 出峰之圖譜及時間。汽油之液相圖譜其出峰時間大約落在 4 至 9 分鐘，依據先前的研究顯示其揮發出之 TPH 為 C6-C9 居多，由氣相之圖譜(圖 4.3)可以看出其 C6 和 C9 出現之時間分別為 4 分鐘及 18 分鐘。圖 4.5 為柴油氣相圖譜，結果顯示揮發出之 TPH 亦以 C6-C9 居多，由此可知汽油及柴油所揮發之物質之碳數範圍相同，多為 C6-C9 之低碳數碳氫化合物。



第四章、研究方法

汽油

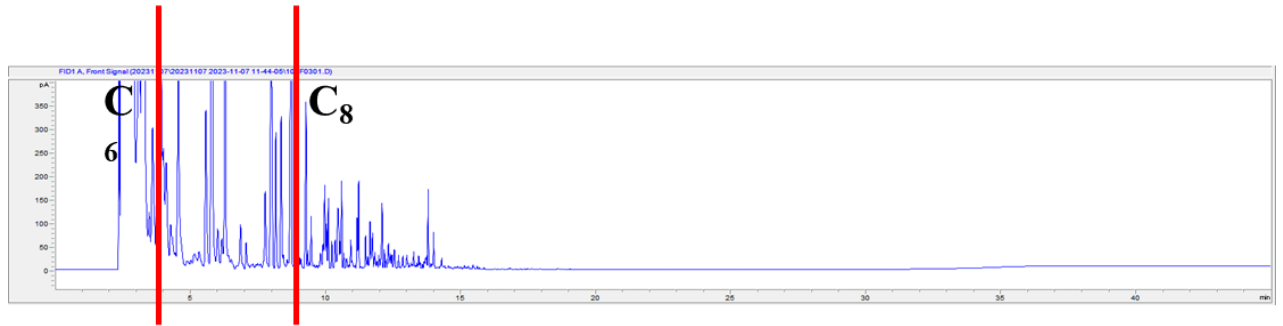


圖 4.2 以 GC/FID 分析之汽油液相圖譜

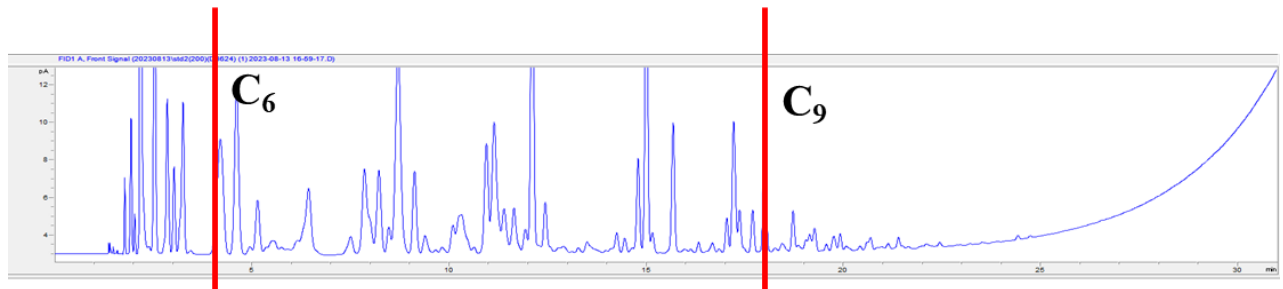


圖 4.3 以 GC/FID 分析之汽油氣相圖譜

柴油

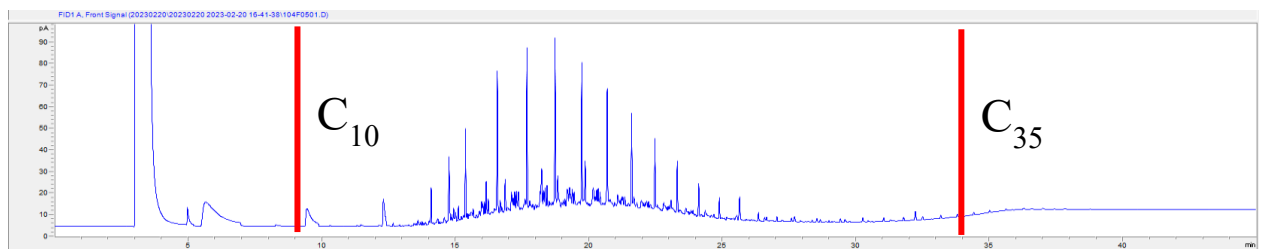


圖 4.4 以 GC/FID 分析之柴油液相圖譜

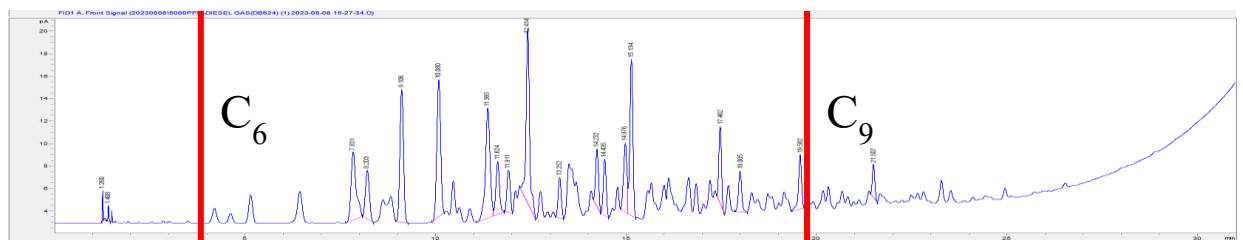


圖 4.5 以 GC/FID 分析之柴油氣相圖譜



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

本研究使用砂質土配置 5,000 ppm、10,000 ppm 及 15,000 ppm 三種不同濃度之柴油污染土壤，並量測三種不同濃度的污染土壤放置於室溫環境下 14 天之氣體逸散特徵，實驗步驟為先預秤取 1 kg 之柴油污染土壤（預先配置三種不同之濃度）裝入 2000 mL 的血清瓶，並使用附有鐵氟龍墊片之瓶蓋將其密封後放置於陰暗處 14 天後，並使用氣密針抽取 1 mL 上層揮發性氣體，使用 GC/FID 分析。結果得知土壤逸散之氣體亦為 C₆-C₉ 居多，可證實後續實驗以直讀式儀器 POLI MP400 所測得知 VOCs 濃度，為此碳數範圍之碳氫化合物。

除上述三種油品之 GC/FID 圖譜外，本團隊也針對常見於土壤及地下水污染中之油品常見的組合物進行鑑定如 MTBE、BTEX 等多種組合物，分析圖譜鑑如圖 4.6 所示。

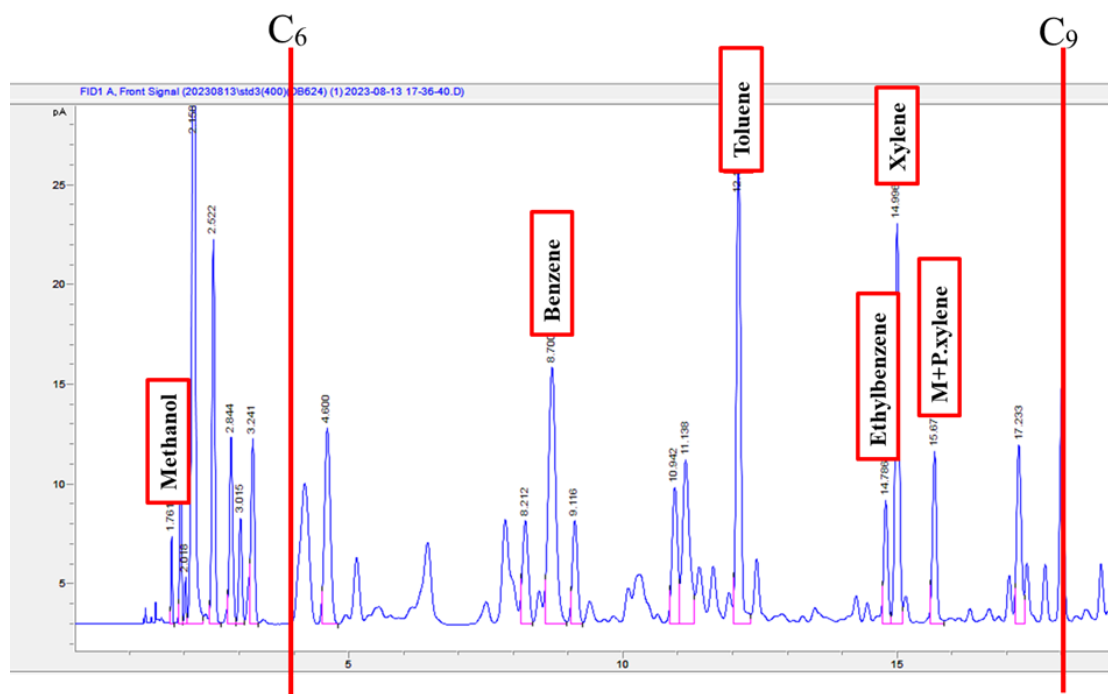


圖 4.6 油品污染土壤中常見之污染物



4.2 土壤揮發性氣體檢測與實驗步驟

本研究依台灣大學農業化學系研究(台灣北部現行耕作制度對農田土壤溫室氣體釋出之影響)為參考，設計以壓克力箱罩住土壤作為採氣罩，對配置之柴油污染土壤逸散氣體進行收集(圖 4.7)。此外，使用 POLI MP400 檢測器對罩內 VOCs 與 CO₂ 濃度進行量測。

每組柴油污染土壤於量測當日前配置，配置完成即放置室外，並均勻加入 DI 水，以達到實驗設計之含水率；若該組別需添加過氧化氫者，則在加入 DI 水後添加 100 mL 9%之 H₂O₂。詳細步驟如下：

步驟(1) 將配置完成之 2 公斤柴油污染土壤堆成土堆形狀並放置室外，以模擬戶外環境，並均勻加入 DI 水，以達到實驗設計之含水率，同時將採氣罩(特製壓克力箱)罩住土壤上方，進行土壤揮發性氣體收集。

步驟(2) 採氣罩罩住土壤後，立即接上 POLI MP400 儀器進行量測並同步計時。

步驟(3) 計時達 10 分鐘後，紀錄儀器顯示之 VOCs 及 CO₂ 濃度值。

步驟(4) 將採氣罩移開土壤上方，並放置於抽氣櫃中，使其通風，以備後續量測。

步驟(5) 並於 50 分鐘後重複上述量測步驟，總共量測四次(在 10、70、130 及 190 分鐘讀取濃度值取平均，其平均值為田口實驗各組別之數據)。

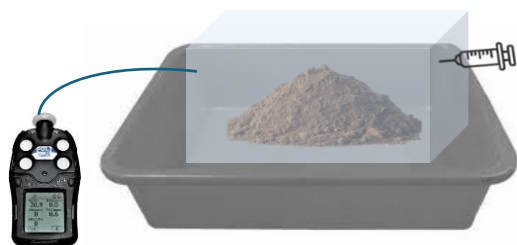


圖 4.7 土壤逸散氣體測量之採氣罩設計圖



4.3 田口實驗因子及參數設計

以田口實驗方法針對柴油污染土壤進行 VOCs 及 CO₂ 之逸散濃度量測，相關影響因子包括油品濃度、土壤質地、翻土次數、土壤含水率、灑水量、灑水/翻土順序及氧化劑添加。如果 7 個控制因子所有變動水準的組合則需要做 128 次實驗，而使用田口博士所設計之 L₈，根據此直交表只要 8 次實驗即可，直交表提供了有系統地且有效率地變動控制因子的方法，本研究以望大特性對逸散率進行控制因子影響評估。控制因子水準表與 L₈ 直交表見表 4.2 及 4.3。依照直交表之參數設計，本研究分別進行汽油與柴油兩組田口實驗，其田口實驗設計相同。執行方式為當天配置柴油污染土並放置室外，並均勻加水使土壤答該組別之含水率，再依組別決定是否添加氧化劑。完成以上步驟，開始計時，並於 10 分鐘時記錄濃度值，其後每間隔一小時進行測量，依序為 70、130 及 190 分鐘。若翻土及水次數為 1 次之組別，在 60 分鐘時進行。若翻土及水次數為 3 次之組別，則分別在 60、120 及 180 分鐘時進行。

表 4.1 土壤逸散氣體量測實驗控制因子水準表

因子	說明	LeveL 1	LeveL 2
A	柴油濃度(mg/kg)	10,000	20,000
B	土壤質地	SL	SCL
C	含水率(%)	25-35	15-25
D	灑水次數(次/天)	1	3
E	翻土次數(次/天)	1	3
F	灑水/翻土順序	先灑水後翻土	先翻土後灑水
G	氧化劑添加	過氧化氫	無添加

註: SL 為砂質壤土，SCL 為砂質黏壤土



第四章、研究方法

表 4.2 土壤逸散氣體量測實驗 L₈ 直交表

exp	A	B	C	D	E	F	G
	柴油濃度 (mg/kg)	土壤 質地	含水率 (%)	灑水 次數	翻土 次數	灑水/翻土 順序	氧化劑添 加
1	10,000	SL	25-35	1	1	先灑水 後翻土	過氧化氫
2	10,000	SL	25-35	3	3	先翻土 後灑水	無添加
3	10,000	SCL	15-25	1	1	先翻土 後灑水	無添加
4	10,000	SCL	15-25	3	3	先灑水 後翻土	過氧化氫
5	20,000	SL	15-25	1	3	先灑水 後翻土	無添加
6	20,000	SL	15-25	3	1	先翻土 後灑水	過氧化氫
7	20,000	SCL	25-35	1	3	先翻土 後灑水	過氧化氫
8	20,000	SCL	25-35	3	1	先灑水 後翻土	無添加

田口實驗因子之數值其設計說明：

- (1) **油品濃度：**依國內污染場址查詢的資料(土壤及地下水污染整治網)顯示，目前受總石油碳氫化合物污染之整治土壤其 TPH 濃度及污染面積之數據，其大部分 TPH 濃度介於 10,000 至 20,000 mg/kg 之間。然而，



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

場址大小也是重要的考量因素，如大林煉油廠之土壤污染 TPH 濃度為 1,530mg/kg，但廠址面積高達二十六萬平方公尺，遠大於大部分廠址面積(小於 2,000 m²)。另外有兩個場址之 TPH 濃度大於 30,000mg/kg，且面積更高達十萬及九十萬平方公尺。因此，本研究配置之 TPH 濃度設定為台灣污染場址常見濃度 10,000 及 20,000mg/kg。

- (2) **土壤質地:** 表 4.3 為台灣區域土壤含水率觀測網之建置與資料分析(江昭輝 et al., 2015)之研究數據，台灣大多土壤質地為壤土、砂質壤土及黏土，因此本研究在挑選土壤質地時，選擇盡量涵蓋含有粒徑最大之砂粒，及粒徑最小之黏粒土壤。在完成質地分析後，確定本研究選用的土壤質地為砂質壤土及砂質黏壤土。

表 4.3 台灣區域土壤含水率觀測網之建置與資料分析

觀測站	量測深度 (公分)	土壤含水率(%)變化範圍		土壤質地
		最大值	最小值	
台中	10	37	9	壤土
	30	36	14	壤土
	70	41	4	壤土
	100	41	11	砂質黏壤土
	150	43	10	黏壤土
日月潭	10	33	4	砂質黏壤土
	30	42	5	砂質黏壤土
	50	35	13	砂質黏壤土
	70	37	7	砂質黏壤土
	80	39	9	砂質黏壤土
嘉義	10	43	3	黏壤土
	30	42	28	黏土
	70	44	33	黏壤土
	100	46	38	黏土
	150	44	43	黏土
台南	10	37	2	砂質壤土
	30	33	5	砂質壤土
	70	38	5	壤土
	100	42	4	壤土
	150	37	14	壤土
恆春	10	45	2	壤土
	30	41	5	壤土
	70	38	9	砂質黏壤土
	100	42	12	砂質黏壤土
高雄	10	34	5	砂質黏壤土
	30	40	6	砂質壤土
台東	70	22	6	砂質壤土
	100	15	3	砂質壤土
	150	29	13	壤土
北東眼山	10	43	16	黏土
	20	37	12	黏土
	30	52	4	黏土
	50	50	6	黏土

*註 1：花蓮、宜蘭、台北因數據缺漏嚴重不列入討論。

*註 2：為簡化數據方便查閱比對，以上數據皆由原始數據無條件捨去小數位。

- (3) **土壤含水率:** 其實驗之含水率設計為 15-25%與 25-35%，主要是土耕法結合生物堆法之實務整治時含水率控制之範圍為 15%至 30%，因此設計此區間之含水率，以更加準確的模擬實際整治場址情形。
- (4) **灑水與翻土:** 生物堆法與土耕法中，灑水與翻土為整治過程中重要的環節，然而根據相關的研究顯示，灑水與翻土會影響整治中之土壤逸散 VOCs 之特性。因此，實驗之設計為在固定的時段內，調整翻土與灑水次數與其操作先後順序，以對 VOCs 之逸散情形有更深入的了解。
- 註:每次灑水量為 50 mL，相當於土壤含水率增加 2.5%。



- (5) **氧化劑添加：**實驗加入氧化劑的原因主要是欲模擬整治過程中，土壤中 TPH 之降解情形。至於氧化劑的選擇，文獻中提到過硫酸鹽有結合生物復育整治之研究，但由於過硫酸鹽需額外做活化，且過硫酸鹽與過氧化氫之降解機制相似，皆會產生活性氧自由基，因此過氧化氫為本實驗氧化劑添加之選擇。

4.4 過氧化氫添加量

以下為過氧化氫在整治時之添加量及濃度：

- (1) 添加量：一般對於 TPH 10,000-20,000 ppm 濃度範圍之土壤，添加過氧化氫量通常在 5-15% 之間。換算為每立方米土壤中添加 500 到 1500 克的過氧化氫。
- (2) 濃度：添加的過氧化氫濃度通常在 3-8% 之間。

以上為整治場址中一般情況下所添加的過氧化氫含量及濃度，本研究藉此範圍做為參考，以增進模擬的相似度。然而，本研究還需考量到配置濃度之準確性及實驗中土壤含水率的設計；因此，最後決定添加量為 5%，濃度為 9%。

4.5 土壤質地分析

土壤質地分析步驟如下：

- (1) 100 g 土壤放置於 500 mL 燒杯加入 DI 水約 150 mL，加入分散劑(偏磷酸鈉)，靜置 1 小時並攪拌使分散劑均勻充滿土壤水。
- (2) 分散後將土壤轉移至 1000 mL 量筒，再用試劑水注滿 1000 mL 量筒。
- (3) 充分上下攪拌使其均勻分散，並開始實驗步驟。
- (4) 將搖晃好的土粒靜置 30 秒後，插入比重計重複此動作兩次，直到讀值誤差於 0.5 即可，開始計時並於 4 分鐘和 2 小時插入比重計，紀錄數值即可當作粉粒及黏粒之用。
- (5) 計算土壤分布。

計算公式如下：

$$\text{砂粒}\% = 100 - [(PS_{US} / W) \times 100]$$

$$\text{黏粒}\% = [(PC / W) \times 100]$$

$$\text{粉粒}\% = 100 - \text{砂粒}\% - \text{黏粒}\%$$



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

其中， PS_{US} 為靜置 30 秒後之比重計讀值且經空白與溫度校正者；PC 為靜置兩小時之比重計讀值且經空白與溫度校正者。經上述實驗求得之砂粒分粒與黏粒百分比，再依圖 4.10 之土壤質地三角圖求得土壤質地種類。

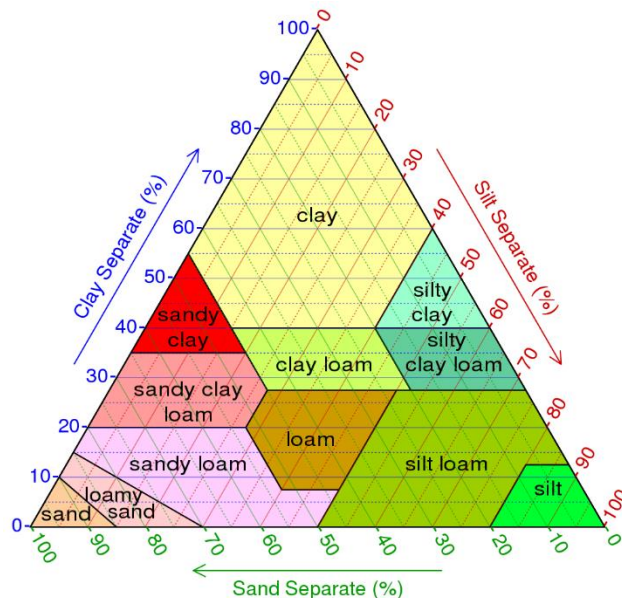


圖 4.8 土壤質地三角圖

4.6 土壤含水率分析

依環保署所公告方法之土壤及底泥水分含量測定方法-重量法(NIEA S280.62C)(行政院環保署，2012)，分析土壤中水分含量百分比(WH_{2O} (m/m,%))，將乾淨之秤量盤置於烘箱內，以 $105 \pm 5^\circ C$ 乾燥烘乾 2 小時後，將其移至乾燥器中冷卻至少 45 分鐘，測量密閉稱量瓶重量(m_0)，精秤 10g 土壤置入稱量瓶，紀錄含土壤之稱量瓶重量(m_1)，將內含土壤之稱量瓶放入 $105^\circ C$ 烘箱持續烘乾 2 小時後，將其加蓋後移至乾燥器中冷卻至少 45 分鐘，而後秤重(m_2)。並以下列公式計算土壤中水分含量：

$$\text{水分含量 } W_{H2O} (\% (m/m)) = (m_1 - m_2) / (m_2 - m_0)$$

m_0 ：含蓋稱量瓶空重(g)

m_1 ：含蓋稱量瓶及風乾土壤重(g)

m_2 ：含蓋稱量瓶及烘乾樣品重(g)



4.7 單位面積土壤之 VOCs 通量計算

依 VOCs 濃度之實場測量結果，計算單位時間內每平方公尺土壤之 VOCs 排放通量，其公式如下：

$$F = H \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{M}{V} \times \left(\frac{273}{273 + T} \right)$$

F = VOCs 交換通量(mg/m²/hr)

H = 氣罩的高度(m)

$\Delta C / \Delta t$ = VOCs 的濃度隨時間的變化斜率 (ppm/hr)

M = VOCs 分子量，78.95 g/ mol，模擬物種為苯。

V = 標準狀態下(0°C, 1atm)氣體的莫耳體積，22.4 L/mol

T = 採氣時罩內氣溫 (°C)

4.8 單位面積土壤之二氧化碳排放通量計算

依二氧化碳濃度之實場測量結果，計算單位時間內每平方公尺土壤之碳排放通量，其公式如下：

$$F = H \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{M}{V} \times \left(\frac{273}{273 + T} \right)$$

F = VOCs 交換通量(mg/m²/hr)

H = 氣罩的高度(m)

$\Delta C / \Delta t$ = CO₂ 的濃度隨時間的變化斜率 (ppm/hr)

M = CO₂ 分子量，44.01 g/ mol

V = 標準狀態下(0°C, 1atm)氣體的莫耳體積，22.4 L/mol

T = 採氣時罩內氣溫 (°C)



4.9 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

本研究之甘特圖如圖 4.9 所示，所有工項皆已完成。

表 4.4 研究計畫甘特圖

工作項目	年月												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
相關文獻、資料收集與彙整													
土壤模擬器之設計、氣體檢測													
田口實驗方法解析柴油污染土壤 整治之空氣污染物排放特徵						※							
田口實驗方法解析柴油污染土壤整 治之碳排放特徵													
對柴油污染土壤整治時之空氣污染 防制方法提出建議													
推估柴油污染土壤逸散之二氧化碳 排放當量													
報告撰寫												※	
工作進度估計百分比 (累 積 數)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%			
預定查核點	期 中	以田口實驗初步結果探討柴油污染土壤 VOCs 逸散濃度趨勢變化											
	期 末	完成田口實驗並分析各因子對 VOCs 逸散濃度之影響，並探討柴油污染場址 VOCs 與 CO ₂ 逸散特性及計算其排放通量											



第五章、結果與討論

5.1 土壤質地分析

依台灣區域土壤含水率觀測網之建置與資料分析(江昭輝 et aL., 2015)之研究數據(表 4.4)顯示，台灣土壤質地大多為壤土、砂質壤土及黏土，因此本研究在挑選土壤質地時，選擇涵蓋含粒徑最大之砂粒及粒徑最小之黏粒土壤。土壤來源為台東某農地及台中某大學校園之無油污污染之土壤，質地分析步驟如 4.5 節所示。結果顯示土壤一之組成為砂粒、粉粒及黏粒分別佔 68、24 及 8%，為砂質壤土；土壤二之組成為砂粒、粉粒及黏粒分別佔 52、18 及 30%，為砂質黏壤土。本次田口實驗選用土壤之質地分析結果如表 5.1 所示。

表 5.1 土壤質地分析

	砂粒(%)	粉粒(%)	黏粒(%)	質地
土壤一	68	24	8	砂質壤土
土壤二	52	18	30	砂質黏壤土

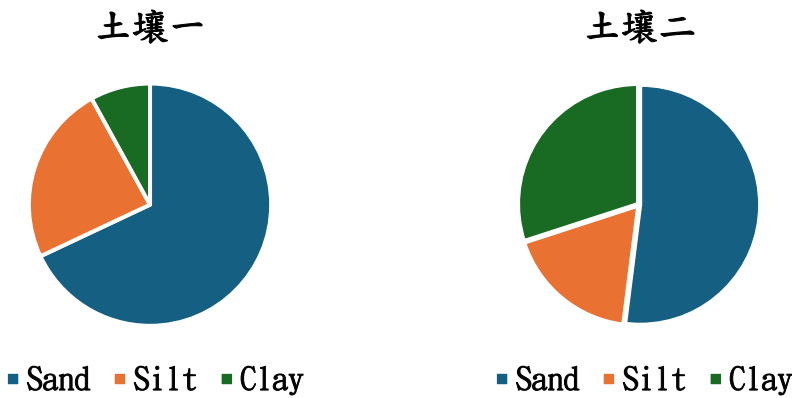


圖 5.1 土壤質地分析



5.2 田口實驗之各組 VOCs 逸散濃度比較

本研究已完成柴油污染土壤 L₈ 田口直交表之量測實驗，對 VOCs 逸散濃度進行田口實驗分析。此外，CO₂ 逸散濃度的量測濃度皆未有顯著變化(大氣中背景值)，因污染土壤為測量當日配置，無經微生物之分解作用，不會產生 CO₂。因此，僅探討 VOCs 逸散濃度結果。此外，由於實驗室進行田口實驗之。以下分別比較 EXP1 與 EXP2、EXP3 與 EXP4、EXP5 與 EXP6 及 EXP7 與 EXP8 共四組之 VOCs 逸散濃度，因上述兩兩一組之主要土壤條件因子皆相同，包含:柴油濃度、土壤質地及含水率。

a. EXP1 與 EXP2 之 VOCs 逸散濃度比較

各因子及參數於表 5.2 所示。表 5.3 及 5.4 之數據為田口實驗第一組及第二組之量測數據；其因子主要差異如下:

- (1) 灑水與翻土次數: EXP 1 為一次(在 60 min)，EXP 2 則為三次(在 60、120 及 180 min)，灑水量每次為 50 mL/次(相當於土壤含水率增加 2.5%)。
- (2) 灑水/翻土順序: EXP 1 為先灑水後翻土，EXP 2 為先翻土後灑水。
- (3) 氧化劑添加: EXP1 添加過氧化氫(100 mL, 9%)，EXP2 無添加。

表 5.2 EXP 1 與 EXP 2 之田口因子及參數對照表

exp	A	B	C	D	E	F	G
	柴油濃度 (mg/kg)	土壤 質地	含水率 (%)	灑水 次數	翻土 次數	灑水/翻土順序	氧化劑添加
1	10000	SL	25-35	1	1	先灑水後翻土	過氧化氫
2	10000	SL	25-35	3	3	先翻土後灑水	無添加

表 5.3 EXP 1 之 VOCs 逸散濃度實驗數據

Time (min)	第一次量測 Conc.(ppm)	第二次量測 Conc.(ppm)	第三次量測 Conc.(ppm)	平均值 Conc.(ppm)
10	57.6	48.4	48.6	51.5
70	18.5	8.9	5.6	11.0
130	0.8	1.1	0.7	0.9
190	0.0	0.0	0.0	0.0



表 5.4 EXP 2 之 VOCs 逸散濃度實驗數據

Time (min)	第一次量測 Conc.(ppm)	第二次量測 Conc.(ppm)	第三次量測 Conc.(ppm)	平均值 Conc.(ppm)
10	18.1	27.5	26.8	24.1
70	0.6	0.9	0.8	0.8
130	0.0	0.0	0.0	0.0
190	0.0	0.0	0.0	0.0

圖 5.2 為 EXP1 及 EXP2 之 VOCs 平均濃度變化趨勢圖，兩組土壤之柴油濃度皆為 10,000 mg/kg，質地為砂質壤土，含水率為 25-35%。EXP1 之初始 VOCs 逸散平均濃度為 51.5 ppm，高於 EXP2 之 24.1 ppm，推測可能原因為 EXP1 測量期間氣溫為 35-36 °C，高於 EXP2 之 32-33 °C 所導致。在 70 分鐘時，兩組濃度皆大幅下降，EXP1 濃度下降至初始值之 21%；EXP2 為 3%，因含水率為較高水準，且皆進行灑水(50 mL)所導致。此外，新鮮配置之污染土壤逸散濃度會隨著時間遞減，在 130 分及 190 分時，僅 EXP1 測量值為 0.9 ppm，其餘皆為 0.0 ppm。至於氧化劑添加及灑水與翻土順序之因子如何影響其逸散濃度，須由田口實驗分析結果才可進一步得知。

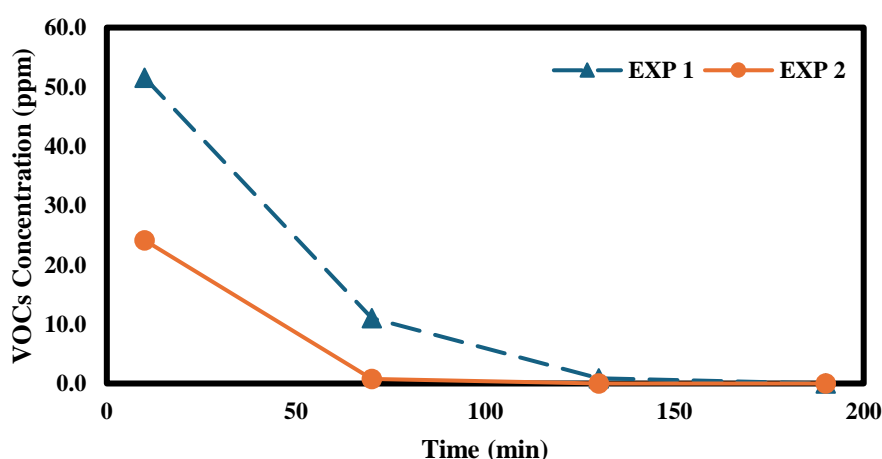


圖 5.2 EXP 1 與 EXP 2 之 VOCs 逸散濃度比較



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

b. EXP3 與 EXP4 之 VOCs 逸散濃度比較

各因子及參數於表 5.5 所示。表 5.6 及 5.7 之數據為田口實驗第三組及第四組之量測數據；其因子主要差異如下：

- (1) 灑水與翻土次數: EXP 3 為一次(在 60 min)，EXP 4 則為三次(在 60、120 及 180 min)，灑水量為 50 mL/次(相當於土壤含水率增加 2.5%)。
- (2) 灑水/翻土順序: EXP 3 為先翻土後灑水，EXP 4 為先灑水後翻土。
- (3) 氧化劑添加: EXP3 無添加，EXP4 添加過氧化氫(100 mL, 9%)。

表 5.5 EXP3 與 EXP4 之田口因子及參數對照表

exp	A	B	C	D	E	F	G
	柴油濃度 (mg/kg)	土壤 質地	含水率 (%)	灑水 次數	翻土 次數	灑水/翻土順序	氧化劑添加
3	10,000	SCL	15-25	1	1	先翻土後灑水	無添加
4	10,000	SCL	15-25	3	3	先灑水後翻土	過氧化氫

表 5.6 EXP3 之 VOCs 逸散濃度實驗數據

Time (min)	第一次量測 Conc.(ppm)	第二次量測 Conc.(ppm)	第三次量測 Conc.(ppm)	平均值 Conc.(ppm)
10	83.4	79.2	79.2	80.6
70	48.3	35.8	31.5	38.5
130	22.5	24.8	21.7	23.0
190	18.6	24.2	27.2	23.3

表 5.7 EXP4 之 VOCs 逸散濃度實驗數據

Time (min)	第一次量測 Conc.(ppm)	第二次量測 Conc.(ppm)	第三次量測 Conc.(ppm)	平均值 Conc.(ppm)
10	105.9	91.3	80.7	92.6
70	66.5	51.3	37.1	51.6
130	35.6	28.1	24.4	29.4
190	9.2	8.2	18.8	12.1



第五章、結果與討論

圖 5.3 為 EXP3 及 EXP4 之 VOCs 平均濃度變化趨勢圖，兩組土壤之柴油 TPH 濃度皆為 10,000 mg/kg，質地為砂質黏壤土，含水率為 15-25%。EXP3 之初始 VOCs 逸散平均濃度為 80.6 ppm，EXP4 為 92.6 ppm，在 70 分鐘時，EXP3 濃度下降至初始值之 48%，EXP4 則下降了 56%，主要因灑水(50 mL)所導致。至 130 分時，EXP3 濃度下降至初始值之 29%；EXP4 則下降了 32%，兩組 VOCs 逸散濃度有明顯接近的趨勢，原因在於 EXP4 在 130 分時有進行灑水，使濃度下降趨勢較 EXP3 為快。直到 190 分，EXP4 濃度為 12.1 ppm，低於 EXP3 之 23.3 ppm。此外，EXP4 之灑水與翻土次數皆多於 EXP3，但 EXP4 之濃度下降趨勢仍大於 EXP3，可初步推測灑水使逸散濃度下降的影響大於翻土使濃度上升的程度，可由後續田口實驗分析結果加以確認。至於氧化劑添加及灑水與翻土順序之因子如何影響其逸散濃度，須由田口實驗分析結果才可進一步得知。

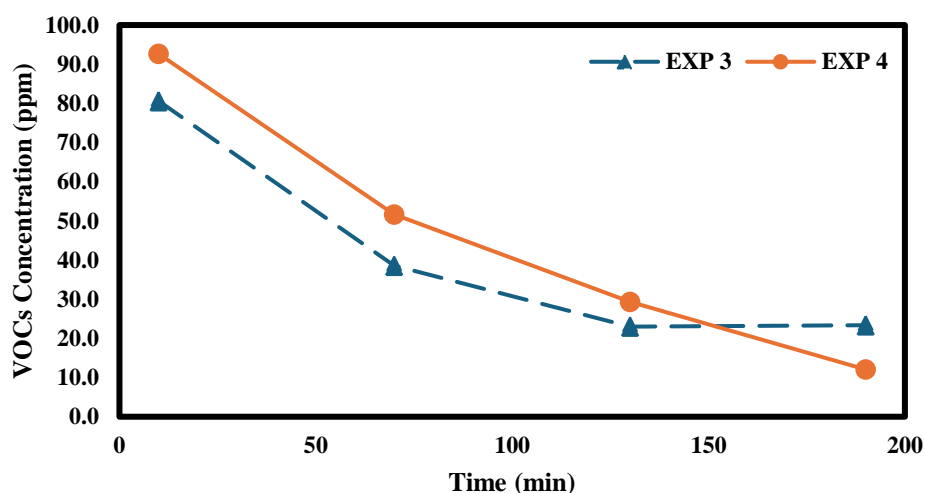


圖 5.3 EXP3 與 EXP4 之 VOCs 逸散濃度比較



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

c. EXP5 與 EXP6 之 VOCs 逸散濃度比較

各因子及參數於表 5.8 所示。表 5.9 及 5.10 之數據為田口實驗第五組及第六組之量測數據；其因子主要差異如下：

- (1) 灑水次數: EXP5 為一次(在 60 min)，EXP6 則為三次(在 60、120 及 180 min)，灑水量為 50 mL/次(相當於土壤含水率增加 2.5%)。
- (2) 翻土次數: EXP5 為三次(在 60、120 及 180 min)，EXP6 為一次(在 60 min)。
- (3) 灑水/翻土順序: EXP5 為先灑水後翻土，EXP6 為先翻土後灑水。
- (4) 氧化劑添加: EXP5 無間加，EXP6 添加過氧化氫(100 mL, 9%)。

表 5.8 EXP5 與 EXP6 之田口因子及參數對照表

exp	A	B	C	D	E	F	G
	柴油濃度 (mg/kg)	土壤 質地	含水率 (%)	灑水 次數	翻土 次數	灑水/翻土順序	氧化劑添加
5	20000	SC	15-25	1	3	先灑水後翻土	無添加
6	20000	SC	15-25	3	1	先翻土後灑水	過氧化氫

表 5.9 EXP5 之 VOCs 逸散濃度實驗數據

Time (min)	第一次量測 Conc.(ppm)	第二次量測 Conc.(ppm)	第三次量測 Conc.(ppm)	平均值 Conc.(ppm)
10	116.8	121.3	126.0	121.4
70	101.4	77.6	68.9	82.6
130	83.9	80.3	99.4	87.9
190	80.6	85.1	77.5	81.1

表 5.10 EXP6 之 VOCs 逸散濃度實驗數據

Time (min)	第一次量測 Conc.(ppm)	第二次量測 Conc.(ppm)	第三次量測 Conc.(ppm)	平均值 Conc.(ppm)
10	99.4	103.9	102.3	101.9
70	75.6	70.2	60.3	68.7
130	24.1	35.6	35.3	31.7
190	22.4	29.2	28.9	26.8



第五章、結果與討論

圖 5.4 為 EXP5 及 EXP6 之 VOCs 平均濃度變化趨勢圖，兩組土壤之柴油濃度皆為 20,000 mg/kg，質地為砂質壤土，含水率為 15-25%。EXP5 之初始 VOCs 逸散平均濃度為 121.4 ppm，EXP6 為 101.9 ppm。在 70 分鐘時，EXP5 濃度下降至初始值之 68%，EXP6 則下降至 67%，兩者下降趨勢相當。然而，至 130 分時，EXP5 之濃度維持在 87.9 ppm，略高於 70 分時之濃度；EXP6 則持續下降至初始濃度之 31%。達 190 分時，EXP5 濃度依然維持為 81.1 ppm；EXP6 下降至初始濃度之 26%。主要原因為在 120 及 180 分時，EXP5 皆對土壤進行翻土；EXP6 則皆為灑水(50 mL)。因此，導致 130 及 190 分之 EXP5 測量濃度將近為 EXP6 之 3 倍。至於氧化劑添加及灑水與翻土順序之因子如何影響其逸散濃度，須由田口實驗分析結果才可進一步得知。

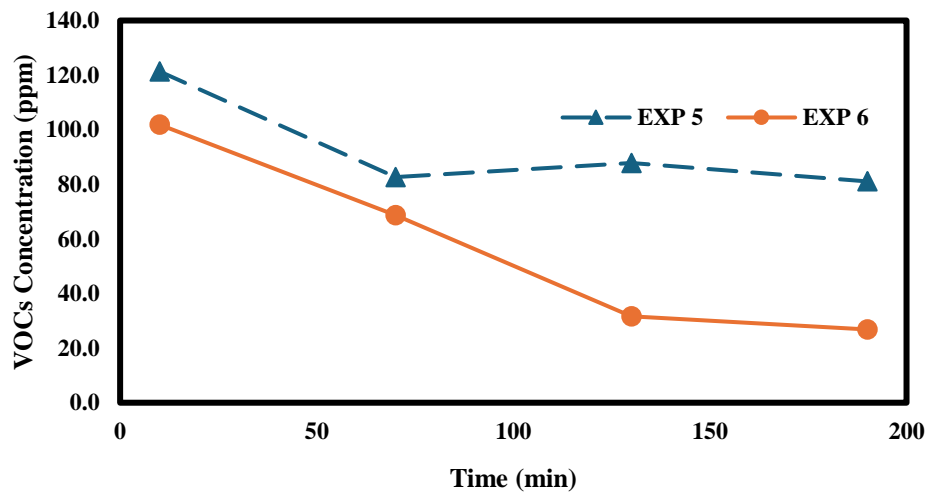


圖 5.4 EXP 5 與 EXP 6 之 VOCs 逸散濃度比較



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

d. EXP7 與 EXP8 之 VOCs 逸散濃度比較

各因子及參數於表 5.11 所示。表 5.12 及 5.13 之數據為田口實驗第七組及第八組之量測數據；其因子主要差異如下：

- (1) 灑水次數: EXP7 為一次(在 60 min)，EXP8 則為三次(在 60、120 及 180 min)，灑水量為 50 mL/次(相當於土壤含水率增加 2.5%)。
- (2) 攤土次數: EXP7 為三次(在 60、120 及 180 min)，EXP8 為一次(在 60 min)。
- (3) 灑水/翻土順序: EXP7 為先翻土後灑水，EXP8 為先灑水後翻土。
- (4) 氧化劑添加: EXP7 有添加過氧化氫(100 mL, 9%)，EXP8 無添加。

表 5.11 EXP 7 與 EXP 8 之田口因子及參數對照表

exp	A	B	C	D	E	F	G
	柴油濃度 (mg/kg)	土壤 質地	含水率 (%)	灑水 次數	翻土 次數	灑水/翻土順序	氧化劑添加
7	20000	SCL	25-35	1	3	先翻土後灑水	過氧化氫
8	20000	SCL	25-35	3	1	先灑水後翻土	無添加

表 5.12 EXP 7 之 VOCs 逸散濃度實驗數據

Time (min)	第一次量測 Conc.(ppm)	第二次量測 Conc.(ppm)	第三次量測 Conc.(ppm)	平均值 Conc.(ppm)
10	98.2	80.7	76.1	85.0
70	57.7	49.1	43.0	49.9
130	64.1	51.2	45.6	53.6
190	55.0	51.0	46.6	50.9

表 5.13 EXP 8 之 VOCs 逸散濃度實驗數據

Time (min)	第一次量測 Conc.(ppm)	第二次量測 Conc.(ppm)	第三次量測 Conc.(ppm)	平均值 Conc.(ppm)
10	86.1	69.4	65.9	73.8
70	62.4	56.2	51.4	56.7
130	23.2	21.7	16.2	20.4
190	7.3	6.3	7.6	7.1



第五章、結果與討論

圖 5.5 為 EXP7 及 EXP8 之 VOCs 平均濃度變化趨勢圖，兩組土壤之柴油濃度皆為 20000 mg/kg，質地為砂質黏壤土，含水率為 25-35%。EXP7 之初始 VOCs 逸散平均濃度為 85.0 ppm，EXP8 為 73.8 ppm。在 70 分鐘時，EXP7 濃度下降至初始值之 59%，EXP8 下降至 77%。EXP7 濃度下降較快，推測受灑水與翻土順序影響有關，但仍需由田口實驗分析結果加以確認。至 130 分時，EXP7 之濃度維持在 53.6 ppm，略高於 70 分時之濃度；EXP8 則持續下降至初始濃度之 28%。達 190 分時，EXP7 濃度依然維持為 50.9 ppm；EXP8 下降至初始濃度之 10%。主要原因為在 120 及 180 分時，EXP7 皆對土壤進行翻土；EXP8 則皆為灑水(50 mL)。因此，導致 130 及 190 分之 EXP7 測量濃度約為 EXP8 之 2.5 至 7.2 倍。至於氧化劑添加是否影響其逸散濃度，須由田口實驗分析結果才可進一步得知。

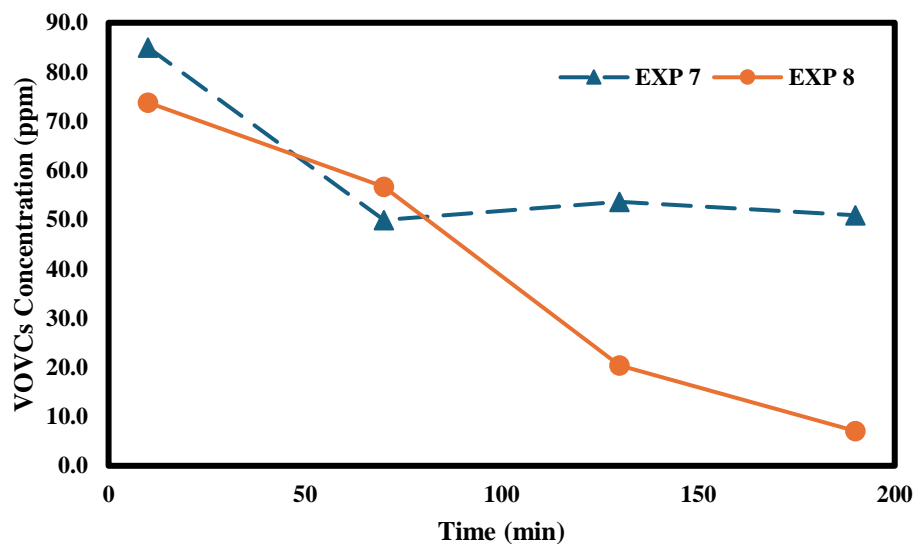


圖 5.5 EXP 7 與 EXP 8 之 VOCs 逸散濃度比較



5.3 VOCs 逸散濃度之田口實驗分析結果

本研究以 L8 直交表進行田口實驗，探討不同整治過程之相關因子探討柴油污染土壤之 VOCs 逸散濃度。控制因子有柴油濃度、土壤質地、含水率、灑水次數、翻土次數、灑水/翻土順序及氧化劑添加，控制因子如表 4.1 所示。以各組在 10、70、130 及 190 分鐘測量之濃度值取平均，為該組別之實驗數據，並依照 L8 直交表設計進行三重複實驗。其 L8 直交表見下表 5.14。

表 5.14 VOCs 逸散濃度之田口實驗表

	A	B	C	D	E	F	G
實驗組別	柴油濃度 (mg/kg)	土壤質地	含水率 (%)	灑水次數	翻土 次數	灑水/ 翻土順序	氧化劑添加
1	10000	SL	25-35	1	1	先灑水後翻土	過氧化氫
2	10000	SL	25-35	3	3	先翻土後灑水	無添加
3	10000	SCL	15-25	1	1	先翻土後灑水	無添加
4	10000	SCL	15-25	3	3	先灑水後翻土	過氧化氫
5	20000	SL	15-25	1	3	先灑水後翻土	無添加
6	20000	SL	15-25	3	1	先翻土後灑水	過氧化氫
7	20000	SCL	25-35	1	3	先翻土後灑水	過氧化氫
8	20000	SCL	25-35	3	1	先灑水後翻土	無添加

註: SL 為砂質壤土，SCL 為砂質黏壤土

表 5.15 為三重複實驗之分析結果，P1、P2 及 P3 分別為三重複實驗之 VOCs 逸散濃度平均值(為 10、70、130 及 190 min 濃度值取平均)，y 為逸散濃度平均值，S 為標準差及 S/N 為雜訊信號比。本研究旨在探討 VOCs 逸散濃度高之原因，故 S/N 比採用望大特性做計算，計算公式如下：

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n}$$



第五章、結果與討論

由表 5.15 可得知 8 組實驗結果中，VOCs 逸散濃度值最高為 93.27 ppm、最低為 4.7 ppm。平均濃度值最高為 EXP5 之 93.27 ppm，最低為 EXP2 之 6.31 ppm，平均 S/N 比介於 15.42-39.39%。濃度平均值(y 值)最高之三個組別為 EXP5、EXP6 及 EXP7，濃度分別為 93.27、57.27 及 59.87 ppm。由因子表可初步得知，此三組之柴油濃度皆較高(20,000 mg/kg)，土壤質地皆為砂質黏壤土，兩組土壤含水率較低(15-25%)，兩組灑水次數較少(1 次)，兩組翻土次數較多(3 次)，皆可能為導致濃度較高之原因。至於濃度值最低之兩個組別為 EXP1 及 EXP2，濃度為 15.83 及 6.31 ppm。可能原因包含：柴油濃度較低(10,000 mg/kg)、土壤含水率較高(25-35%)及灑水次數較多(3 次)，由初步推斷可知，柴油濃度、土壤質地、含水率、灑水次數與翻土次數皆為影響土壤 VOCs 逸散濃度之影響因子。其 8 組實驗結果之逸散濃度平均值、標準差及 S/N 比分布，分別如圖 5.6、5.7 及 5.8 所示。田口實驗以 VOCs 逸散濃度平均值計算其 S/N 比，圖 5.6 之各組別平均值高低分布與圖 5.8 之 S/N 比分布相同，最大值之兩組為 EXP5 及 EXP7，平均值為 93.27 及 59.87 ppm，對應其 S/N 比為 39.39 及 35.3；最小值之兩組為 EXP1 及 EXP2，平均值為 15.83 及 6.23 ppm，對應其 S/N 比為 23.72 及 15.42。

表 5.15 VOCs 平均逸散濃度結果與 S/N 比

Exp.	P1	P2	P3	y	S	S/N
1	19.2	14.6	13.7	15.83	2.41	23.72
2	4.7	7.1	6.9	6.23	1.09	15.42
3	43.2	41.0	39.9	41.37	1.37	32.32
4	54.3	44.7	40.3	46.43	5.85	33.14
5	95.7	91.1	93.0	93.27	1.89	39.39
6	55.4	59.7	56.7	57.27	1.80	35.15
7	68.8	58.0	52.8	59.87	6.66	35.39
8	44.8	38.4	35.3	39.50	3.96	31.81

油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

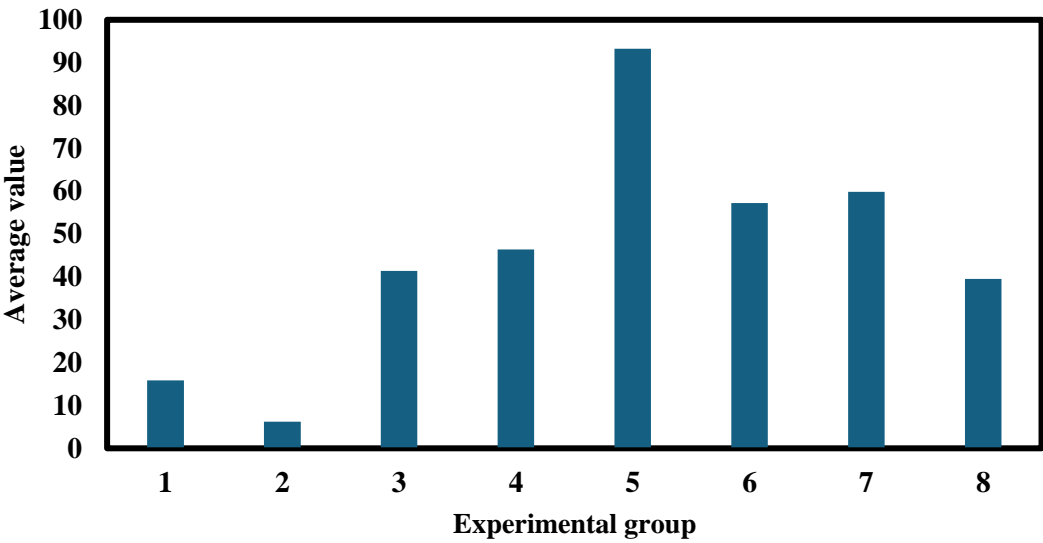


圖 5.6 VOCs 逸散濃度平均值分布

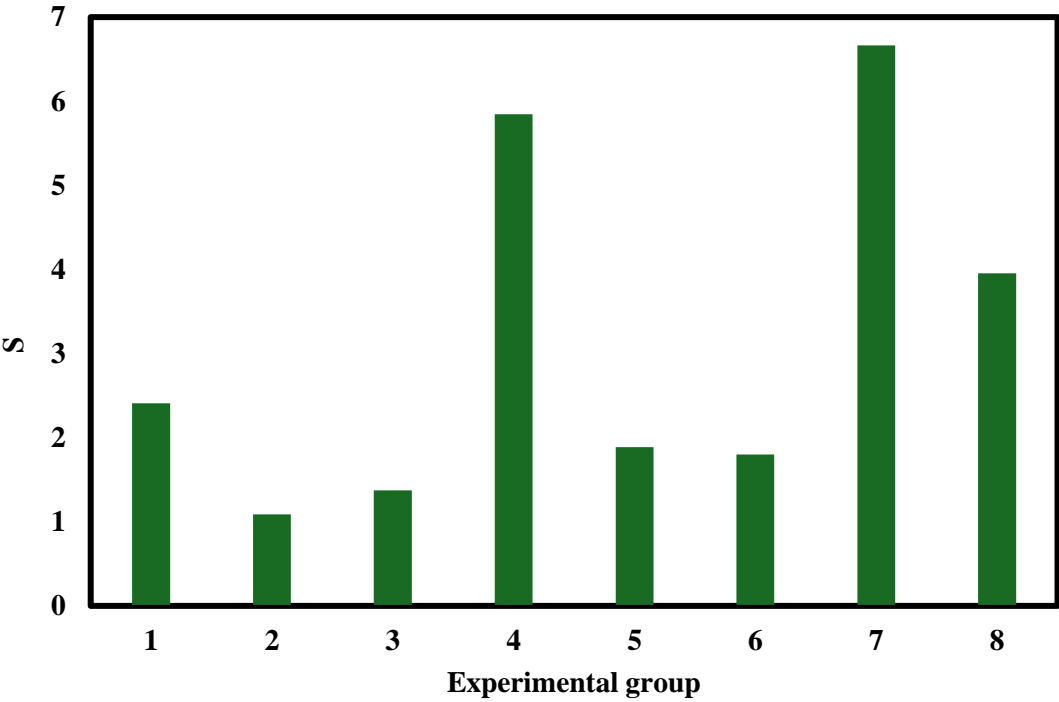


圖 5.7 VOCs 逸散濃度標準差分布

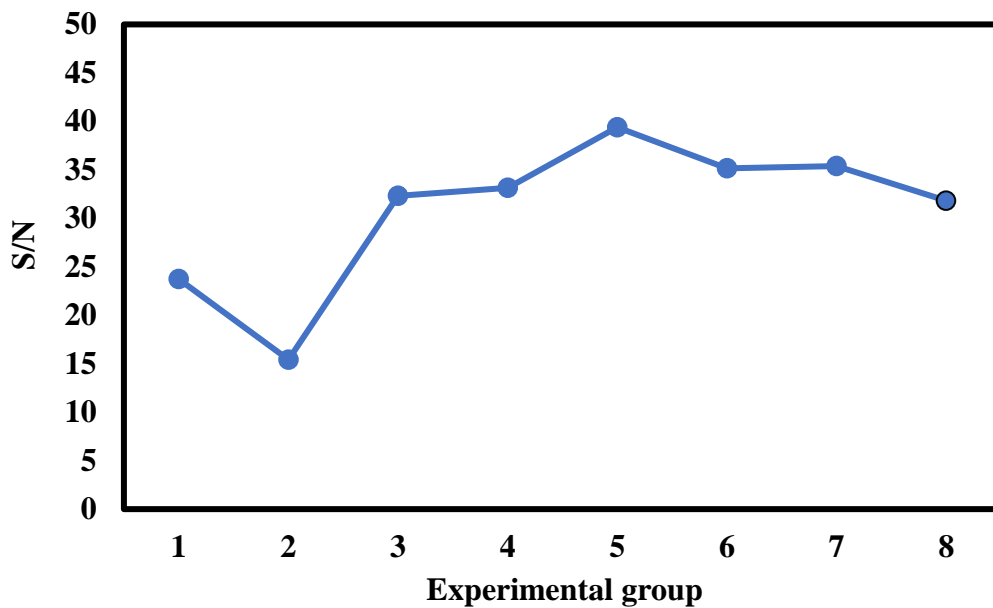


圖 5.8 VOCs 逸散濃度值 S/N 比分布

5.3.1 田口實驗因子效應與品質特性分析

依因子反應表(Response table)及品質特性反應圖可以知道田口實驗中各項控制因子對於品質特性的影響程度。因此，將 8 組實驗結果對 S/N 比因子反應表和反應圖，從田口實驗品質工程原理可以得知，計算方法為將每一個控制因子於同一水準下，所對應到之 S/N 比取平均值，以下以本次田口實驗數據為例：

A 因子於水準 1 的 S/N 比之平均值為：

$$S/N \text{ 比平均值} = (23.72 + 15.42 + 32.32 + 33.14) / 4 = 26.15$$

A 因子於水準 2 的 S/N 比平均值為：

$$S/N \text{ 比平均} = (39.39 + 35.15 + 35.39 + 31.81) / 4 = 35.43$$

而因子 A 從第 1 水準變動到第 2 水準(即柴油濃度從 10000 mg/kg 變化成 20000 mg/kg)時，S/N 比(或品質特性)的平均變動量稱為 A 的因子效應，可以表示成：

$E_A^{1 \rightarrow 2}$ 以本實驗數據為例：

$$E_A^{1 \rightarrow 2}(1 \rightarrow 2) = 35.43 - 26.15 = 9.28$$

計算結果以下表所示，並將結果繪製成控制因子表及品質特性反應圖。



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

將 8 組實驗之 VOCs 逸散濃度平均值與 S/N 比製作成 S/N 比反應表與 S/N 比反應圖，如表 5.16 及圖 5.9 所示，再以實驗結果對 VOCs 逸散濃度平均值(y)可製作品質特性反應表及品質特性反應圖，分別如表 5.17 及圖 5.10 所示。由品質特性反應表可得知最佳化實驗之控制因子，因 VOCs 逸散濃度實驗中控制因子的變動對 S/N 比與品質特性之影響程度的趨勢不盡相同，因此以下因子效應以品質特性反應之結果進行討論。

因子 A(柴油濃度)之水準 2 較高，表示較高柴油濃度會顯著增加 VOCs 逸散濃度，且其因子效應($E_A^{1 \rightarrow 2}$)之值在七項因子中為最大，代表**柴油初始濃度會顯著影響 VOCs 逸散濃度**；因子 B(土壤質地)之水準 2 較高，表示砂質黏壤土使 VOCs 逸散濃度略為增加，然而其因子效應在七項因子中僅排第六，可得知土壤質地對於 VOCs 逸散濃度之影響不大；因子 C(含水率)之水準 2 較高，表示含水率較低者(15-25%)，VOCs 逸散濃度越高，且其因子效應在七項因子中排第二，顯示**含水率亦是影響 VOCs 逸散濃度之重要因子**；因子 D(灑水次數)之水準 1 較高，表示灑水次數較少，VOCs 逸散濃度越高，其因子效應排第三；因子 E(翻土次數)之水準 2 較高，表示翻土次數較多，VOCs 逸散濃度越高，其因子效應排第四。值得關注的是：**灑水與翻土此兩項因子之因子效應變動範圍差距不大，其值分別為 -15.23 及 12.96**，灑水之影響略大於翻土，顯示兩因子對於 VOCs 逸散濃度之影響程度相當，但灑水對於逸散濃度呈負相關，翻土則為正相關。因子 F(灑水/攤土順序)之水準 1 較高，表示先灑水後翻土使 VOCs 逸散濃度較高，因子效應排第五，後續將探討其機制；因子 G(氧化劑添加)因子效應之值僅為 0.24，其對 VOCs 逸散濃度較無關聯性。



第五章、結果與討論

表 5.16 VOCs 逸散濃度 S/N 比反應表

	柴油 濃度 (A)	土壤 質地 (B)	含水率 (C)	灑水 次數 (D)	翻土 次數 (E)	灑水/翻土 順序(F)	氧化劑 添加 (G)
Level 1	26.15	28.42	26.58	32.71	30.75	32.01	31.85
Level 2	35.43	33.16	35.00	28.88	30.84	29.57	29.73
E ^{1→2}	9.28	4.74	8.41	-3.83	0.09	-2.45	-2.12
Rank	1	3	2	4	7	5	6
Significance	YES	YES	YES	NO	NO	NO	NO

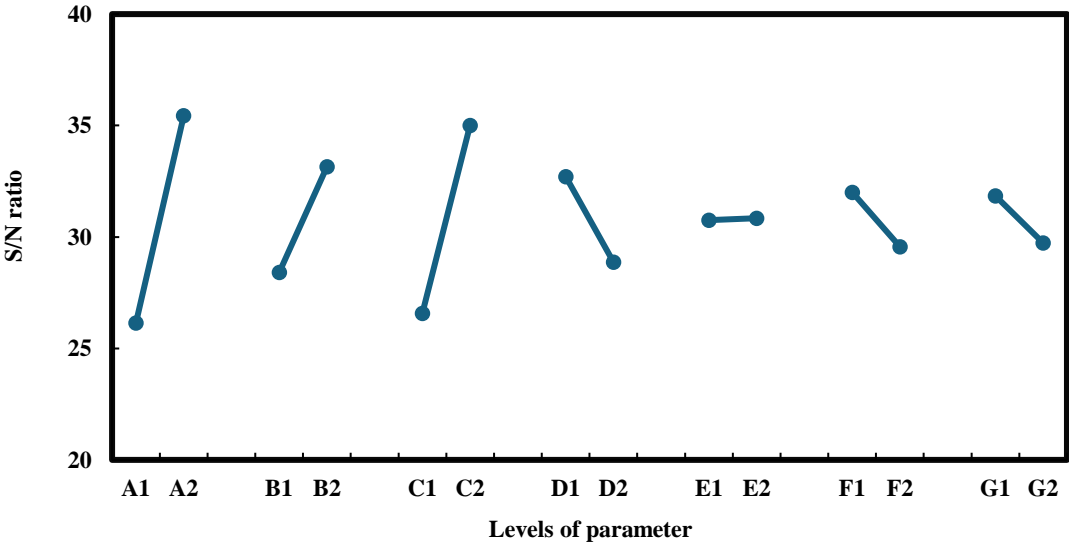


圖 5.9 VOCs 逸散濃度控制因子 S/N 比反應圖

表 5. 17 VOCs 逸散濃度品質特性反應表

	柴油 濃度 (A)	土壤 質地 (B)	含水率 (C)	灑水 次數 (D)	翻土 次數 (E)	灑水/翻土 順序(F)	氧化劑 添加 (G)
Level 1	27.47	43.15	30.36	52.58	38.49	48.76	44.85
Level 2	62.48	46.79	59.58	37.36	51.45	41.18	45.09
E ^{1→2}	35.01	3.64	29.23	-15.23	12.96	-7.58	0.24
Rank	1	6	2	3	4	5	7
Significance	YES	NO	YES	YES	NO	NO	NO

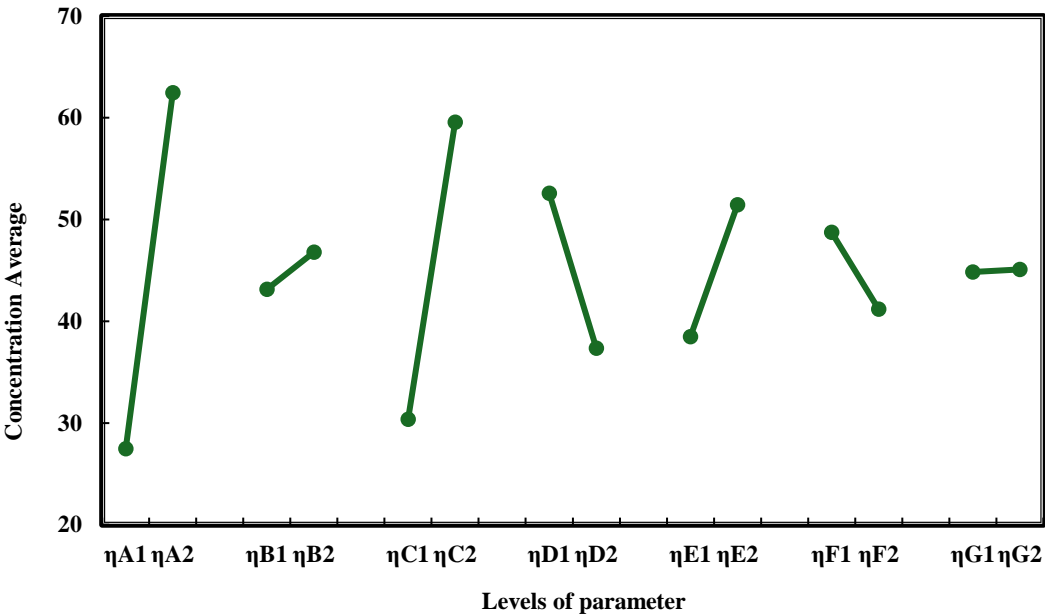


圖 5. 10 VOCs 逸散濃度品質特性反應圖



5.3.2 田口實驗之最佳化測試

表 5.16 為田口實驗分析之品質特性反應表，由表可知 VOCs 逸散濃度最高之水準條件組合為 A2、B2、C2、D1、E2、F1、G2。最佳參數組合為柴油濃度 20,000 mg/kg、土壤質地為砂質黏壤土、含水率為 15-25%、灑水次數 1 次、翻土次數 3 次、灑水/翻土順序為先灑水後翻土及氧化劑添加為無添加。將上述之參數組合進行實驗，進一步確認其田口因子實驗得出之結果是否具代表性。實驗結果如下表 5.17 所示，VOCs 平均逸散濃度範圍為 82.34-91.29 ppm。

表 5.18 田口實驗之最佳化測試

	P1(%)	P2(%)	P3(%)	平均值(ppm)
最佳化組別	88.54	91.29	84.76	88.20

預測最佳參數水準組合之 SN 比計算如下：

$\bar{\eta} = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8) / 8$ ，其中 η_1 為實驗組別 EXP1 之 SN 比。

$\bar{\eta} = (23.72 + 15.42 + 32.32 + 33.14 + 39.39 + 35.15 + 35.39 + 31.81) / 8 = 30.79$

$SN = A2 + B2 + C2 + D1 + E2 + F1 + G2 - (7-1)\bar{\eta}$ ，A2 為因子 A 水準 2 的 SN 比

$= (35.43 + 33.16 + 35.00 + 32.71 + 30.84 + 32.01 + 29.73) - (7-1) * 30.79 = 44.14$

表 5.18 之最佳化測試之 SN 比經計算為 38.9，與預測之 SN 比之值 44.14 差距不大，表示田口實驗成功。



5.4 柴油污染場址現場量測結果

5.4.1 場址簡介

本研究除了於實驗室配置新鮮柴油污染土進行測量外，期中報告後亦於高雄港某碼頭之柴油污染場址進行現地量測實驗，場址相關資訊如表 5.19 所示。其污染土壤於 8 月 1 日開挖至地表，堆置成土堆，並將帆布覆蓋於土堆上方(圖 5.11 所示)，本團隊分別於 8 月 30 日、9 月 6 日及 9 月 10 日至現場進行量測。此外，為了解現地及實驗室土壤逸散特性之異同，本研究取現地之土壤帶回實驗室，分析土壤質地、含水率及柴油污染濃度。結果顯示，因污染場址位於碼頭，土壤組成大部分以砂粒為主，其比例為砂粒 98%、粉粒 2%及黏粒 0%，質地為砂土。含水率分析依 NIEA S280.62C 之水分含量百分比方法進行，將土壤放置於 105 烘箱中達 24 小時，因測量不出水分損失之重量，因此推測其風乾土之含水率趨近於 0%；柴油污染濃度以二氯甲烷萃取土壤之三重複分析，計算其平均濃度為 1,092 mg/kg。

表 5.19 污染場址土壤基本資訊

開挖日期	8/1
測量日期	8/30、9/06、9/10
砂粒(%)	98%
粉粒(%)	2%
黏粒(%)	0%
土壤質地	砂土
含水率(m/m,%)	風乾土(趨近於 0%)
柴油污染濃度	1,092 mg/kg



圖 5.11 碼頭污染場址土堆

現場量測之目的在探討開挖過程及堆置成土堆之過程中，其 CO_2 及 VOCs 逸散情形及排放量。因此，測量前會翻動土壤以模擬開挖及堆置土壤之過程，並以壓克力箱氣罩罩住土壤上方，立即接上 POLI MP400 儀器進行量測並同步計時(圖 5.12)，每次量測時間與前述田口實驗相同為 10 分鐘。因後續將計算其排放通量，測量過程於每分鐘紀錄 CO_2 及 VOCs 濃度值，藉以觀察 CO_2 及 VOCs 逸散速率。圖 5.13 及 5.14 為 9 月 6 日量測之 CO_2 及 VOCs 數據 (一小時內測量三組之數據，量測時間間隔 10 分鐘，等待儀器數值下降回背景值)。以 9 月 6 日第 1 小時之前 10 分鐘為例， CO_2 濃度於每 2 分鐘之增加量依序為 270、190、390、250 及 140 ppm。至於 VOCs 於每 2 分鐘之增加量依序為 15.8、8.6、11.2、7.5 及 6.6 ppm。可觀察其各時間段之濃度增加量有高低變化，並無一開始濃度累積較快導致後半段之濃度增加量大幅減少之情形。表示氣罩內之濃度尚未達飽和，使後續計算單位時間內之排放通量時，其數值較準確。



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究



圖 5.12 現場量測示意圖

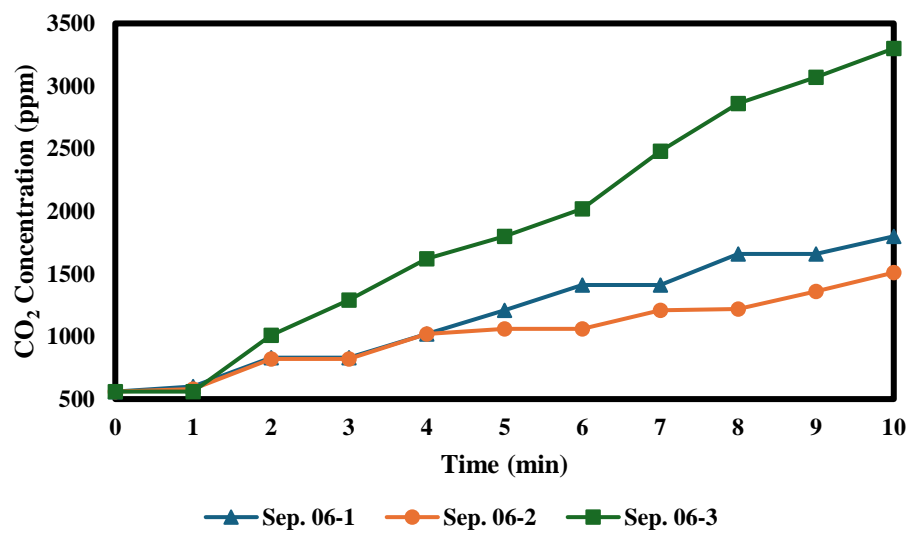


圖 5.13 測量 10 分鐘期間之氣罩內 CO₂ 濃度變化

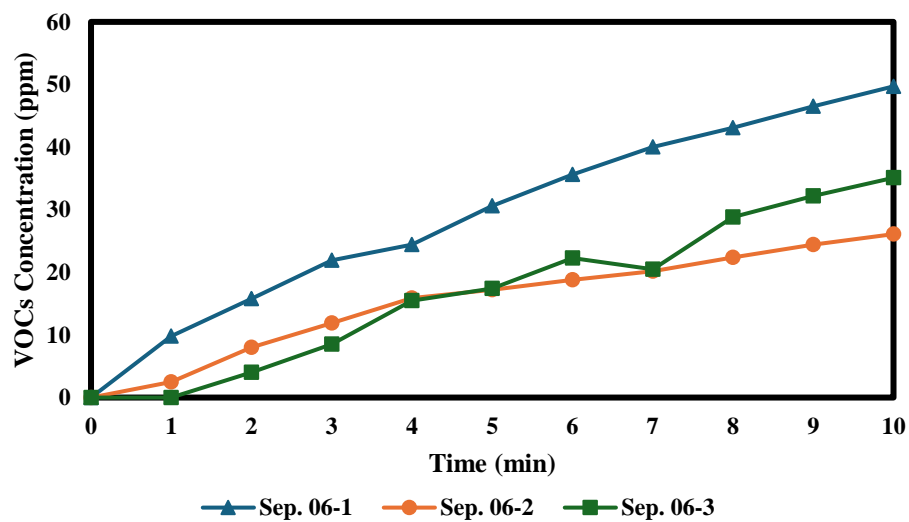


圖 5.14 測量 10 分鐘期間之氣罩內 VOCs 濃度變化



5.4.2 VOCs 與 CO₂ 逸散特徵比較

場址氣溫會影響其 VOCs 逸散濃度，氣溫越高時，易提升 VOCs 之逸散濃度(Ausma, 2002)，因此本團隊於現場測量時於每小時記錄氣溫值，因 8 月 30 日僅進行一小時測量，其值只有一筆為 42°C；9 月 6 日量測三小時之溫度分別為 37、35 及 33°C；9 月 10 日三筆量測溫度分別為 39、39 及 38°C。

備註:圖 5.15 之 Sep. 06-1 表示其 9/06 之第一小時測量之溫度值，Sep. 06-2 為第二小時測量之溫度值。依此類推。

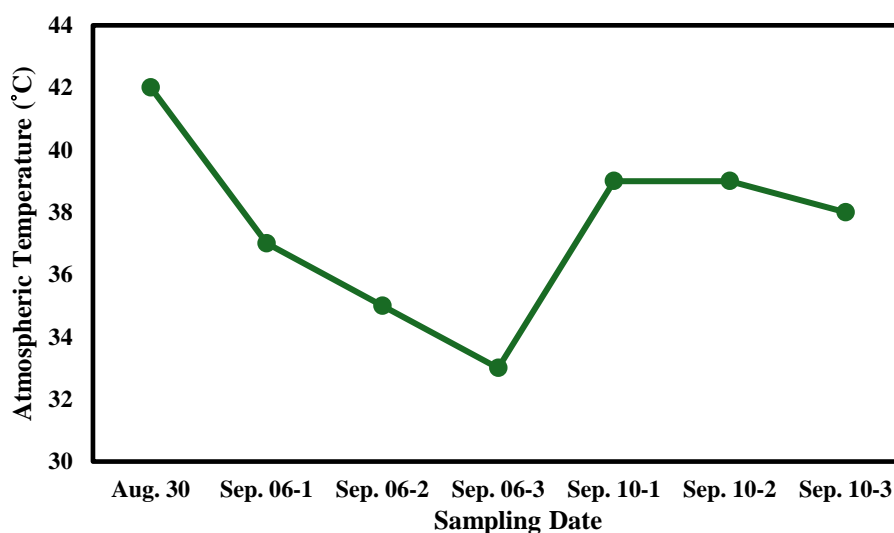


圖 5.15 測量期間之場址氣溫

圖 5.16 及 5.17 以盒鬚圖表示每小時內測量三組(10 分鐘一組)之測量期間氣罩內 CO₂ 及 VOCs 濃度。因 8 月 30 日只測量一小時，故只有一組盒鬚圖數據；9 月 6 日及 9 月 10 日皆連續測量三小時，各有三組盒鬚圖。測量組別於第二及第三小時開始前，皆會進行翻土，即每間隔一小時翻土(相同位置)。結果顯示，8 月 30 日之 VOCs 逸散濃度最高值之平均為 100.8 ppm；9 月 6 日及 9 月 10 日 VOCs 最高值之平均為 51.2 及 102.9 ppm。因最高值為測量時間達 10 分鐘之濃度值，其後續排放通量亦以最高值之濃度做計算。比對溫度及 VOCs 濃度可知，溫度為場址 VOCs 逸散濃度之關鍵因子。8 月 30 日及 9 月 10 日平均氣溫為 42 及 39°C，其 VOCs 逸散濃度高於 9 月 6 日(其平均氣溫僅 35°C)之 VOCs 濃度約 2 倍。此外，因上層土壤含水率趨近於 0%，亦會導致溫度影響程度增大。



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

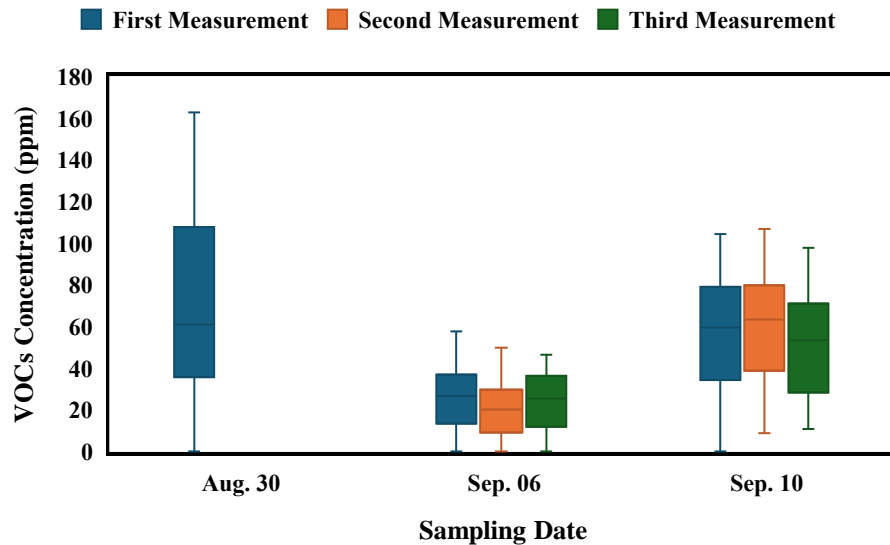


圖 5.16 測量 10 分鐘期間氣罩內之 VOCs 濃度值統計

圖 5.17 顯示三天現場土壤量測之逸散 CO_2 濃度，8 月 30 日、9 月 6 日及 9 月 10 日之 CO_2 逸散濃度最高值之平均分別為 2,084、2,651 及 2,033 ppm；比對溫度與 CO_2 之數據，可觀察到 CO_2 逸散濃度受溫度之影響較小，因 9 月 6 日之氣溫為測量三天之最低者(35°C)，然而濃度在當日測量第三小時之前 10 分鐘達最高濃度 4,980 ppm，推測原因為 9 月 5 日下午有降雨，其土壤濕度較高，導致增強其微生物活性及呼吸作用，使 CO_2 逸散濃度有大幅增加之情形。此外，土壤二氧化碳排放量影響因子還包含通氣性和有機質的有效性((Ausma, 2002)。

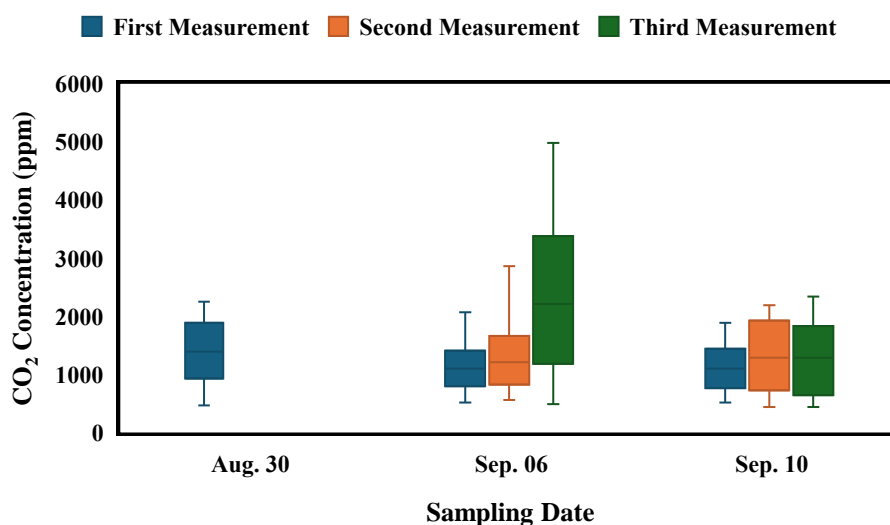


圖 5.17 測量 10 分鐘期間氣罩內之 CO_2 濃度值統計



第五章、結果與討論

為探討翻土對 VOCs 及 CO₂ 之逸散濃度之影響，本研究擷取圖 5.16 及 5.17 之數據繪製圖 5.18 及圖 5.19，由圖可知土壤經翻動後之 VOCs 及 CO₂ 之逸散濃度變化。實驗設計為每小時對相同位置至之土壤進行翻動，分別於 0、60 及 120 分鐘時進行，翻土深度約 10-20 公分，測量時間為 0-10 分鐘測量，10-20 分鐘等待儀器之濃度值下降至背景值，20-30 再進行測量之交替方式進行。圖 5.18 顯示 9 月 10 日之 VOCs 逸散濃度由 10 分鐘時之 104.3 ppm 降至 50 分鐘之 60.7 ppm，下降 42%；而 70 分鐘時之 106.7 ppm 降至 110 分鐘之 68.5 ppm，下降 36%及 130 分之 97.7 ppm 降至 170 分之 57.7 ppm，下降 41%。可觀察出經翻土後之一小時內濃度變化趨勢皆十分相似。至於 9/6 之三組分別下降 34%、30%及 27%，下降比率與 9/10 類似，推測原因為因土壤質地皆為砂土，其孔隙率大，且含水率皆趨近於 0%，使土壤結構相對不複雜，VOCs 從土壤孔隙中逸散路徑較一致。至於 CO₂ 也因土壤通氣性良好之原因，使逸散濃度趨勢穩定維持在約 2,000 ppm。不同之處在於，VOCs 逸散濃度經翻土後短時間內濃度值易發生大幅度改變，CO₂ 則相對穩定。

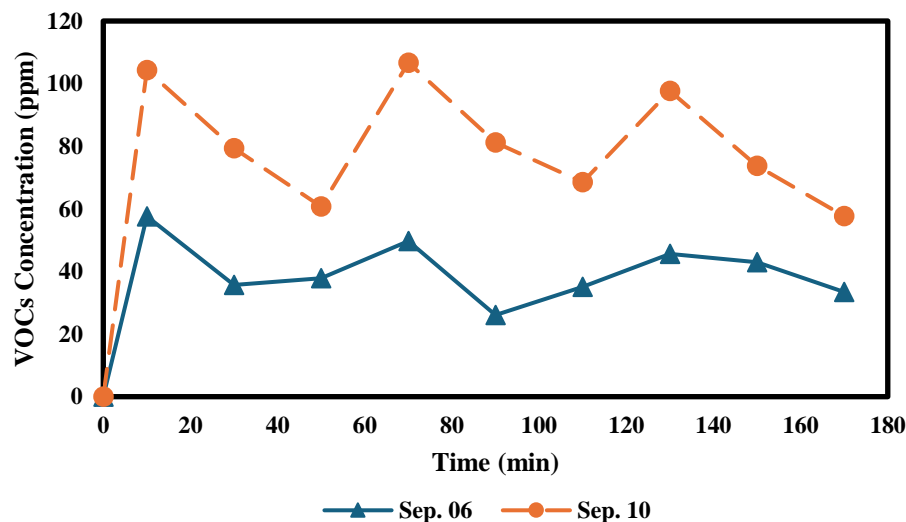
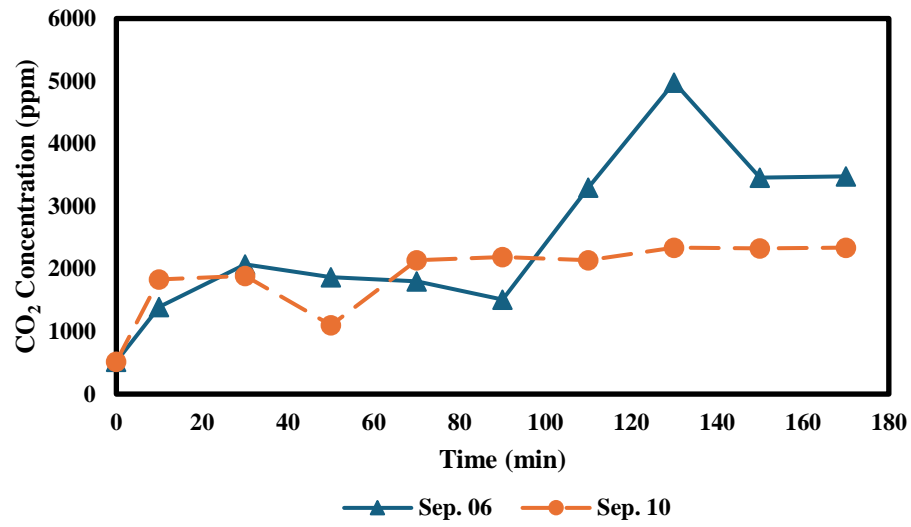


圖 5.18 受翻土影響之 VOCs 濃度變化趨勢



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

圖 5.19 受翻土影響之 CO₂ 濃度變化趨勢



5.4.3 VOCs 與 CO₂ 逸散濃度之通量計算

本研究依實場測量 VOCs 與 CO₂ 濃度之結果計算單位時間內每平方公尺土壤之 VOCs 與 CO₂ 排放通量，並與文獻計算之濃度做比較，其公式如下：

$$F = H \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{M}{V} \times \left(\frac{273}{273 + T} \right)$$

文獻(Asuma, 2002)之油品污染之污染物碳數為 C5-C13 之間，與本次柴油污染場址相似，因碳數小於 15 之化合物較易揮發 (Douglas et al, 1992)。文獻研究之 THC 排放通量在翻土完達到高峰時，其通量為 84–105 µg/m²/s 之間(含水率 5%)，本研究計算之通量如表 5.18 及 5.19 所示，其 VOCs 通量為 25.9–117.2 µg/m²/s，其高峰值差異不大。然而，文獻中之 CO₂ 濃度約在 100–200 µg/m²/s 之間，本研究計算通量範圍為 249.3–1,929.2 µg/m²/s，且大部分介於 500–800 µg/m²/s，高於文獻濃度。推測可能原因為本團隊實驗之柴油污染場址，其柴油污染濃度為 1,092 mg/kg，低於文獻之 5,100 mg/kg，高濃度之污染可能會抑制土壤微生物之好氧呼吸作用，導致 CO₂ 排放量較低 (Liang et al., 2009; Liang et al., 2016)。

表 5.20 VOCs 排放通量計算結果

Time (min)	Aug.30 Conc. (ppm)	Aug.30 Flux (µg/m ² /s)	Sep.06 Conc. (ppm)	Sep.06 Flux (µg/m ² /s)	Sep.10 Conc. (ppm)	Sep.10 Flux (µg/m ² /s)
10	153.5	117.2	57.6	44.7	104.3	80.4
30	71.1	54.3	35.7	27.7	79.4	61.2
50	68.6	52.4	37.8	29.3	60.7	46.8
70	-	-	49.7	38.6	106.7	82.3
90	-	-	26.1	20.3	81.2	62.6
110	-	-	35.1	27.2	68.5	52.8
130	-	-	45.6	35.4	97.7	75.3
150	-	-	43	33.8	73.7	56.8
170	-	-	33.4	25.9	57.7	44.5



表 5. 21 CO₂ 排放通量計算結果

Time (min)	Aug.30 Conc. (ppm)	Aug.30 Flux (μ g/m ² /s)	Sep.06 Conc. (ppm)	Sep.06 Flux (μ g/m ² /s)	Sep.10 Conc .(ppm)	Sep.10 Flux (μ g/m ² /s)
10	2250	736.5	1390	376.3	1830	563.0
30	1890	583.2	2070	670.5	1890	588.8
50	2120	681.1	1870	584.0	1100	249.3
70	-	-	1800	553.7	2140	696.3
90	-	-	1510	428.2	2190	717.7
110	-	-	3300	1202.5	2140	696.3
130	-	-	4980	1929.2	2340	782.2
150	-	-	3460	1271.7	2330	777.9
170	-	-	3480	1280.4	2340	782.2

註：表中之 CO₂ 濃度(ppm)為測量時儀器讀取值，計算通量須扣除其背景濃度。



5.4.4 場址之風化污染土於實驗室量測結果

為比較現地場與實驗室逸散氣體之差異，本研究將場址之風化土壤帶回實驗室進行逸散氣體量測實驗，初步測試結果顯示因帶回實驗室測量的土壤量僅 3 公斤，無法測量 CO₂ 之逸散濃度變化(與大氣背景 CO₂ 濃度相似)，因此後續只探討 VOCs 之數據。實驗方法與田口實驗相同，將土壤堆置成土堆形狀，放置於塑膠盆中以模擬生物堆，土堆之表面積略小於氣罩之底面積(35*25 cm)，並於室外進行量測實驗。此外，不額外調整土壤含水率，僅以風乾土進行實驗，於 0、120 及 180 分鐘對整座土堆進行翻土；至於 60 分鐘時進行灑水，灑水量 30 mL(相當於土壤含水率增加 1%)。

圖 5.20 顯示於 0 分鐘進行翻土，10 分鐘後之 VOCs 濃度測得為 30.6 ppm，至 50 分鐘時，為 17.6 ppm，下降了 42%，其下降趨勢百分比與圖 5.18 之實場結果相似，其下降百分比之範圍為 30-40%之間。可推測其下降趨勢不受土堆高度與土壤量之影響，應符合多數場址之逸散情況。於 60 分鐘進行灑水，其 VOCs 濃度下降，在 110 分鐘其濃度降到 0 ppm；值到 120 分鐘再次翻土，濃度上升至 15.2 ppm，其隨後依然下降；直到 180 分鐘再次翻土時，濃度略上升至 2.4 ppm。

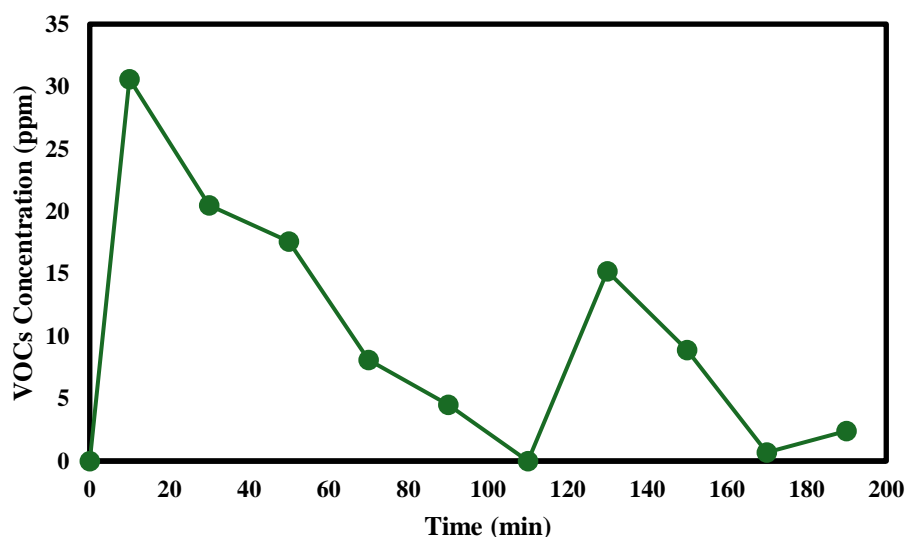


圖 5.20 場址之風化土於實驗室進行量測



5.5 影響受 TPH 污染土壤逸散氣體之機制探討

5.5.1 田口因子對 TPH 污染土壤之 VOCs 逸散機制探討

田口實驗主要是將土壤堆置成像生物堆之形狀，在探討 VOCs 之一算機制時，找尋生物堆逸散機制之相關文獻。其生物堆與空氣之間的熱傳導可分為三個階段：正向傳熱、雙向傳熱、反向傳熱(Zheng, 2021)，傳熱驅動石油揮發。然而，揮發性污染物仍對環境構成風險。研究表明，在寒冷地區土工膜覆蓋的生物堆中，43% 的石油因揮發損失而被去除(Martínez Álvarez et al., 2017b)，這可能會造成嚴重的空氣污染。多孔 NAPL(非水相液體)流動的控制方程式是基於質量、動量和能量的平衡方程式(Koley, 2002 ; Lu et al., 2014)

$$\phi \left(X_n \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + \nabla \cdot (X_n \rho \mathbf{u} - D \nabla X_n) = F_n \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{\mu} k (\nabla p - \rho \mathbf{g}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & (\rho C)_e \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot ((C_{p,n} \rho_n + C_{p,g} \rho_g) T \mathbf{u} - K_e \nabla T) \\ & = \nabla \cdot (\rho C_n T \mathbf{u}) + q_e + \phi \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla p \cdot \mathbf{u} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$\phi[-]$ 是孔隙率， ρ [kg m⁻³] 是密度， $t[s]$ 是時間， u [m s⁻¹] 是混合物的達西速度， F [kg m⁻³ s⁻¹] 是混合物的匯/源項， $X_n[-]$ 是混合物中 NAPL 蒸氣的質量分數， D [m² s⁻¹] 為(非恆定的)擴散係數。

圖 5.22 顯示生物堆之土壤 NAPL 濃度隨著深度增加而提高(Zheng, 2021)，因位於越深處之土壤，其 NAPL 之揮發路徑越長，且受到外部之氣溫影響越小，且溫度較低，使 NAPL 及 VOCs 濃度皆高於深度較淺之土壤。

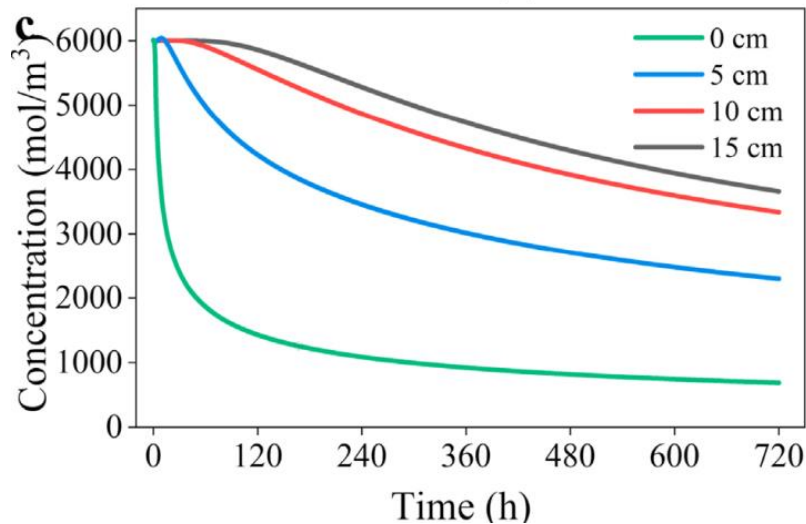


圖 5.21 生物堆之土壤深度與 NAPL 濃度關係圖

a. 土壤質地

土壤質地之差異主要為砂粒、粉粒及黏粒之組成比例不同，其粒徑直徑大小依序為砂粒>粉粒>黏粒。因此，土壤質地會影響土壤孔隙率大小；孔隙率越大之土壤，其 VOCs 逸散濃度應越大。然而，依本次田口實驗品質特性之望大分析結果顯示，土壤質地在七項因子中僅排第六，且水準 2 之砂質黏壤土 VOCs 逸散濃度略高於砂質壤土。推測原因為因兩種土壤之組成比例之差異不大，且最主要原因為實驗之含水率範圍較高為 15-35%。其孔隙率皆大幅縮小，因此，影響程度不明顯。

b. 含水率

含水率越大，其 VOCs 逸散濃度越低。因較高之含水率使土壤孔隙率縮小，且 VOCs 於水中傳輸速率較空氣慢(Jury et al., 1990)，此外，因水的比熱較大，亦會使傳熱效率變差，導致降低 VOCs 逸散量。

c. 灑水次數

灑水次數越多，使 VOCs 濃度降少。除了因為會增加含水率外，灑水灑在土壤上方，會降低靠近土壤表層之孔隙率，其土壤表層亦是生物堆中發生逸散最主要的位置。此外，亦使土壤表層溫度降低，抑制傳熱效率，使 VOCs 逸散量減少。



d.翻土次數

翻土次數越多，增加 VOCs 逸散濃度。因如圖 5.21 所示，因翻土會將位於生物堆內部或深度較深之 NAPL 濃度較高之土壤翻至土壤表層，且翻土會使土壤密度降低，通氣性增加，孔隙率亦提高。因此，增加翻土次數增加 VOCs 逸散量。

e. 灑水/翻土順序

先灑水後翻土之順序，使 VOCs 逸散濃度較高。因先灑水後翻土會使土壤較鬆散，通氣性增加，其先前灑水導致土壤孔隙率下降之影響力降低。至於先翻土後灑水，使 VOCs 逸散濃度較低，因後續灑水導致先前翻土使土壤孔隙率提升之影響力降低，且灑水灑在土壤上方，會降低土壤表層之孔隙率，且土壤表層亦是生物堆中發生逸散最主要的位置。



第六章 結論與建議

6.1 結論

- (1) 柴油及汽油污染土壤逸散之氣體 VOCs 皆以 C₆–C₉ 主要組成之有機物。
- (2) 本研究完成田口實驗 L₈ 直交表分析，依品質特性分析各因子影響 VOCs 逸散濃度之因子效應排序為：油品濃度(35.01 ppm)、土壤含水率(29.23 ppm)、灑水次數(15.23 ppm)、翻土次數(12.96 ppm)、灑水/翻土順序(7.58 ppm)、土壤質地(3.64 ppm)及最後之氧化劑添加(0.24 ppm)。
- (3) 依田口實驗之品質特性結果分析，土壤含水率較低者，其 VOCs 逸散濃度較高。
- (4) 經田口實驗之品質特性結果分析，灑水對 VOCs 之逸散濃度呈負相關，翻土則呈正相關。
- (5) 依田口實驗之品質特性結果分析，土耕法之整治過程若翻土後再進行灑水作業，可有效降低 VOCs 逸散。
- (6) 當場址進行開挖或整治時，若氣溫較高之時段，應更注重其 VOCs 逸散之控制。
- (7) 污染土壤經翻動後之一小時內，CO₂ 逸散濃度相較於 VOCs 較穩定且無明顯變化；至於 VOCs 逸散濃度下降率約為 30-40%，與實驗室量測結果一致。推論其 VOCs 逸散量隨時間之下降趨勢與土堆高度及土壤量無關，其符合多數場址之情況。
- (8) 以本研究場址之柴油污染土壤經翻土後一小時內，其 CO₂ 通量平均值為 786 µg/m²/s，與相關研究比較，為台灣農田耕作之二氧化碳排放通量的 11-33 倍，對於場址面積較大者，其碳排放量不容忽視。

6.2 建議

- (1) 未來現地實驗可進一步討論灑水對於 VOCs 及 CO₂ 之逸散濃度影響。
- (2) 現地測量可考慮於量測前進行翻土一次，並進行長時間連續監測，探討 VOCs 及 CO₂ 逸散濃度趨勢。



第七章、參考文獻

- Álvarez, L. M., et al. (2017). "Bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils in cold regions: Development of a pre-optimized biostimulation biopile-scale field assay in Antarctica." *Science of the Total Environment* 590: 194-203.
- Amponsah, N.Y., Wang, J., Zhao, L., 2018. A review of Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of commonly used ex-situ soil treatment technologies. *Journal of Cleaner Production* 186, 514-525.
- Ausma, S., 2001. Landfarming of petroleum hydrocarbons: development and evaluation of methods to monitor their impact on the atmosphere. University of Guelph.
- Ausma, S., et al. (2002). "VoLatile hydrocarbon emissions from a diesel fuel-contaminated soil bioremediation facility." *Journal of the Air & Waste Management Association* 52(7): 769-780.
- Ausma, S., et al. (2003). "Laboratory-Scale Measurement of Trace Gas Fluxes from Landfarm Soils." *Journal of environmental quality* 32(1): 8-22.
- Charles, A., Rochette, P., Whalen, J.K., Angers, D.A., Chantigny, M.H., Bertrand, N., 2017. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236, 88-98.
- Chemlal, R., et al. (2012). "Microbiological aspects study of bioremediation of diesel-contaminated soils by biopile technique." *International biodeterioration & biodegradation* 75: 201-206.
- Franco, M. G., et al. (2014). "Emission of volatile organic compounds and greenhouse gases from the anaerobic bioremediation of soils contaminated with diesel." *Water, Air, & Soil Pollution* 225: 1-9.
- Islam, M.N., Jo, Y.-T., Park, J.-H., 2014. Remediation of soil contaminated with lubricating oil by extraction using subcritical water. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20, 1511-1516.
- Kuppusamy, S., MaddeLa, N.R., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., 2020. An Overview of Total Petroleum Hydrocarbons. in: Kuppusamy, S., MaddeLa, N.R., Megharaj, M., Venkateswarlu, K. (Eds.). *Total Petroleum Hydrocarbons: Environmental Fate, Toxicity, and Remediation*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1-27.
- Liu, B., Chen, L., Huang, L., Wang, Y., Li, Y., 2015. Distribution of volatile organic compounds (VOCs) in surface water, soil, and groundwater within a chemical industry park in Eastern China. *Water Science and Technology* 71, 259-267.



- Liu, P.-F., et al. (2021). "Remediation of weathered diesel-oil contaminated soils using biopile systems: An amendment selection and pilot-scale study." *Science of the Total Environment* **786**: 147395.
- Lv, Y., Bao, J., Zhu, L., 2022. A comprehensive review of recent and perspective technologies and challenges for the remediation of oil-contaminated sites. *Energy Reports* 8, 7976-7988.
- Naik, M., Duraphe, M., 2012. Review paper on-Parameters affecting bioremediation. *Advance Research in Pharmaceuticals and Biologicals* 2.
- Ossai, I.C., Ahmed, A., Hassan, A., Hamid, F.S., 2020. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation* 17, 100526.
- Pardo, F., et al. (2016). "Optimization of the application of the Fenton chemistry for the remediation of a contaminated soil with polycyclic aromatic hydrocarbons." *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 91(6): 1763-1772.
- Pradhan, S. P. and V. J. Srivastava (1997). "A pilot-scale demonstration of an innovative soil remediation process: air emissions quality." *Journal of the Air & Waste Management Association* 47(6): 710-715.
- Pugliese, G., et al. (2023). "Effects of drought and recovery on soil volatile organic compound fluxes in an experimental rainforest." *nature communications* **14**(1): 5064.
- Ramachandra, T.V., AithaL, B.H., Sreejith, K., 2015. GHG footprint of major cities in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44, 473-495.
- Santos, A., Firak, D.S., EmmeL, A., SiedLecki, K., Lopes, A., Peralta-Zamora, P., 2018. Evaluation of the Fenton process effectiveness in the remediation of soils contaminated by gasoline: Effect of soil physicochemical properties. *Chemosphere* 207, 154-161.
- Siddique, T., et al. (2006). "Biodegradation of short-chain n-alkanes in oil sands tailings under methanogenic conditions." *Environmental science & technology* **40**(17): 5459-5464.
- Rossabi, S., et al. (2018). "Volatile organic compound emissions from soil following wetting events." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **123**(6): 1988-2001.
- Seo, Y., Cho, K.-S., 2021. Effects of plant and soil amendment on remediation performance and methane mitigation in petroleum-contaminated soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 31, 104.
- Wang, H., Zhao, R., Zhao, D., Liu, S., Fu, J., Zhang, Y., Dai, N., Song, D., Ding, H., 2022. Microbial-Mediated Emissions of Greenhouse Gas from Farmland



油品污染土壤之空氣污染物逸散特徵及碳排係數調查研究

Soils: A Review. *Processes* 10, 2361.

Watts, R.J., Haller, D.R., Jones, A.P., Teel, A.L., 2000. A foundation for the risk-based treatment of gasoline-contaminated soils using modified Fenton's reactions. *Journal of Hazardous Materials* 76, 73-89.

Yang, J., et al. (2018). "Increased soil methane emissions and methanogenesis in oil contaminated areas." *Land Degradation & Development* 29(3): 563-571.

Yang, J., et al. (2018). "Microbial functional gene patterns related to soil greenhouse gas emissions in oil contaminated areas." *Science of the Total Environment* 628: 94-102.

Yi, Y.M., Park, S., Munster, C., Kim, G., Sung, K., 2016. Changes in ecological properties of petroleum oil-contaminated soil after low-temperature thermal desorption treatment. *Water, Air, & Soil Pollution* 227, 1-10.

You, Y., et al. (2021). "Methane emissions from an oil sands tailings pond: a quantitative comparison of fluxes derived by different methods." *Atmos. Meas. Tech.* 14(3): 1879-1892.

Zheng, Y.-M., et al. (2021). "High proportions of petroleum loss ascribed to volatilization rather than to microbial degradation in greenhouse-enhanced biopile." *Journal of Cleaner Production* 303: 127084.

蔡右容, 2020. 探討不同溫度於土壤中化石柴油之影響. 環境工程與管理系. 朝陽科技大學, pp. 1-32.

江昭輝, et al. (2015). "台灣區域土壤含水率觀測網之建置與資料分析." 大氣科學 43(2): 133-150.