



行政院環境保護署

108 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

以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物 整治技術試驗計畫

期末報告(第二年定稿)

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立高雄師範大學／生物科技系(所)
專案主持人：陳士賢 教授
專案執行期間：2018 年 01 月 10 日起至
2019 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 108 年 12 月









行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐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	108 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它		主持人： 陳士賢 NO：A9
計畫名稱	以超高溶氧奈米器泡水強化現地生物整治技術試驗計畫(二)		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 部份菌株屬貧養性，及部份菌株屬厭氧性，建議討論。		1. 地下環境中有不同適合微生物生存之微棲地，因此微生物會在地下中尋找適合生長之處進行生存及繁殖，本場址歷經多年界面活性劑淋洗整治及其他工法，土壤中物理及化學特性多已改變，土壤有機質減少，基線調查顯示本場址地下環境中土壤之酸鹼值為中性，氮含量約為 0.008－0.027%之間，平均為 0.015%，此中之氮含量略低於一般土壤之含氮量，此區之總磷濃度範圍約為 241-444 mg/kg，平均為 390 mg/kg，此地下環境中之磷含量低於一般土壤之含磷之平均濃度，因此會有貧養性微生物存在，而雖有高溶氧水注入於地下環境，地下水溶氧因距離關係形成濃度梯度，部分未影響區域中厭氧性細菌存在屬正常現象，本計畫觀察重點在於好氧菌是否伴隨高溶氧水注入而增生。	
2. 氣栓的可能？		2. 根據場址地質調查報告，場址之土壤組成為粉質細砂、細砂夾中砂層，由於砂質成分比例較高，其透水性良好，同時奈米氣泡由於直徑小於 200 nm，因此長期觀察較無氣栓之產生條件及影響地下水通透性。	
3. Stripping 的可能？		3. 因奈米氣泡獨特的物理性質，使奈米氣泡不易上浮改變壓力而破裂，故奈米氣泡可以在環境中存在更久的時間，較不易造成 Stripping 現象。	
4. 本期末報告對計畫執行現況、流程及方法說明具體。		4. 感謝肯定。	
5. 計畫後續執行工作項目及內容已於 P.95 說明。		5. 敬悉。	
6. 計畫執行進度與預定進度查核表大致相符。		6. 敬悉。	
7. 本期末報告並未說明執行進度是否落後，也未說明計畫執行期間的困難點。		7. 本計畫之執行進度皆依預定進度執行，並無落後情事，本計畫於執行期間所遇到的困難點為地質異質性使距離注水井較遠之監測井 MW2 的溶氧值必須仰賴長時間灌注，主要	



<p>8. 本期末報告所提出的研究內容與計畫目的相符。</p> <p>9. 根據研究內容所提出之討論與建議的可行性與應用性應有更具體的說明，以期具參考意義(短期提供極高量的溶氧的意義？藉由高溶氧以提升菌種數對污染改善的意義？Pseudomonas 數量減少的效應？…等)(相對而言，本計畫成果顯示增加 DO 的 ROI 則更具意義)(是否過度供氧？過度超出微生物好氧分解所需的氧量？)(高溶氧與菌相變化以及處理成效之間的關係建議討論)。</p> <p>10. 本計畫執行有研究人員(學生或助理)參與。</p> <p>11. 本計畫的學術產出為：本期末報告、期刊論文。</p> <p>12. 本計畫執行期間有研究人員(學生或助理)參與，人才培育符合預期。</p> <p>13. 本期末報告的研究成果中說明，本研究計畫已提供可供技術轉移的技術。</p> <p>14. 本計畫的執行與研究成果對土水污染整治的政策，以及對社會經濟發展的效益，不易由本報告中評估。</p>	<p>為提升溶氧有效影響範圍之議題，故無另行說明。</p> <p>8. 感謝肯定。</p> <p>9. 本計畫成果主要顯示在增加 DO 使溶氧影響半徑 ROI 擴大，在實際模場試驗中觀測到於注水井 GW1 灌注高溶氧水後能有效提升監測井 MW1 及 MW2 之溶氧，推測傳輸範圍達一公尺以上，考量微生物代謝過程需消耗水中溶氧，同時場址地下水流經該模場時造成之稀釋，故提供濃度較高之溶氧以利微生物使用，尚不致殆盡，可促進微生物放大作用。</p> <p>10. 敬悉。</p> <p>11. 敬悉。</p> <p>12. 敬悉。</p> <p>13. 敬悉。</p> <p>14. 本計畫的執行與研究成果對土水污染整治的技術改進提供參考，但對社會經濟發展的效益，非本計畫訴求，不易由本報告中評估。</p>
<p>委員二</p> <p>1. 名稱使用宜統一，例如報名中使用高飽和溶氧水、高溶氧水、高溶氧奈米氣泡水、奈米水等，另建議不宜使用奈米水。</p> <p>2. Air Sparging 類工法，灌注井之開篩區間及其深度為現地處理影響半徑之重要控制因子，建議納入討論說明。</p> <p>3. 目標與進度皆符合，報告撰寫優良。</p> <p>4. 奈米氣泡水之應用須經由井灌注，建議增加地下水氣提法之技術文獻回顧內容，並且於</p>	<p>1. 感謝建議，報告內文已修正統一名稱。</p> <p>2. 本計畫旨在於將高溶氧水灌入地下，營造適合微生物生長之高溶氧環境以分解水中 VOCs，屬加強好氧生物整治法，與地下水氣提法以物理方式驅走水中 VOCs 概念較不同，本場址之監測井及注入井設置是以該場址歷年水位變化為參考，開篩位置為地表下約 3 公尺至 7 公尺處，但因計畫經費所限，並未試驗不同開篩區間對於灌注之效果有何優劣。在實際模場試驗中觀測到於注水井 GW1 灌注高溶氧水後能有效提升監測井 MW1 及 MW2 之溶氧，推測傳輸範圍達一公尺以上，ROI 已討論於「結果與討論」章節。</p> <p>3. 感謝肯定。</p> <p>4. 將高溶氧水灌入地下營造適合微生物生長之高溶氧環境以分解水中 VOCs，屬加強好氧</p>





<p>討論中增加奈米氣泡水工程應用面向與地質條件關聯性之討論，以強化此技術未來應用性說明。</p>	<p>生物整治法，與地下水氣提法以物理方式驅走水中 VOCs 概念較不同，因此地下水氣提法之技術文獻收集非本計畫重點。受限於計畫經費無法探究不同水文地質條件對高溶氧水傳輸之影響，廠區內之土壤主要為矽質黏土、矽質細砂間隔組成，於地表下 0—2.5 m 及 11.5—15 m 處夾有高塑性有機黏土薄層。從地表以下 1—2 m 為道路鋪面與回填材料等；接著其下為黏質矽土、矽質黏土及矽質細砂等不均夾層，直至約地下 3—4 m 處，從地下 3—4 m 開始則普遍為細砂夾中砂層，其透水性良好；依據以往資料報告指出，廠內之地下水位亦多在此間變化，模場所在之處屬矽質細砂、細砂夾中砂層，屬地下水能夠順利傳輸之地質。</p>
<p>5. 成果績效自評部分，建議於備註加以說明各項績效。</p>	<p>5. 感謝建議，已修正。</p>
<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 微生物投菌後，除溶氧條件外，其他環境因子之影響或是微生物生長條件影響因子(如營養鹽)，是否有具體之建議？ 2. 本計畫對於投入之菌種，在改變溶氧條件後，菌種生長之穩定性如何？對長期生物復育技術而言，建議可有較具體之操作條件參考依據或範圍，以供未來技術選擇之參考。 3. 經兩年之研究成果，有關高溶氧奈米水抽注試驗，依不同現地水文地質條件，溶氧濃度之影響半徑，是否有較為具工程參考之建議？以利後續現地操作之參考。 4. 請釐清或評估本計畫中生物降解有機物之具體成效。此外環境因子對生物降解之影響性，亦宜一併說明。 5. 請補充說明地下水採樣分析結果之變化趨勢，其中提及當連續注水 24 小時後，部份有機物(如乙苯、甲苯等)濃度反有增加之現 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本試驗僅將高溶氧水注入該模場，營造適合原生生物生長，其營養鹽類則按照原地原始狀況並無另行調整或添加。 2. 投菌後暫停注水一週以避免影響菌種生長，從菌相分析報告得知此做法能有效提升菌相濃度，而後續繼續以 12 hr/day 的頻率進行注水一個月之菌相顯示濃度下降約 2—4 倍，由於計畫時程所限，目前未能得知往後將降至之平衡濃度為何。 3. 試驗位置受限於計畫徵求書內容規範與限制而無法試驗不同地質條件，本模場所在之處屬矽質細砂、細砂夾中砂層，在實際模場試驗中觀測到於注水井 GW1 灌注高溶氧水後能夠有效提高監測井 MW1 及 MW2 之溶氧，故傳輸範圍達一公尺以上，此操作參數及影響半徑已提供整治單位參考。 4. 經過一年灌注試驗，污染物濃度已大幅下降，在五個井位均呈現此趨勢，但乙苯及苯仍具高濃度，尤其乙苯仍是主要污染物，在地下水樣品中常有純相出現，至於污染物濃度大幅下降是灌注水稀釋及帶出純相污染物或生物降解作用何者貢獻較多甚難判斷。 5. 對比灌注一年期間前後的目標污染物檢測數據得知，經過一年的高溶氧水注水後，苯的濃度從最初基線調查之 198—266 mg/L



<p>象，宜釐清可能之原因。</p> <p>6. 請補充供給溶氧與現地微生物生長狀況間之關係或影響因素。</p>	<p>降至 ND—15.1 mg/L，而乙苯其濃度也從最高 5398 mg/L 降至 1.25—639 mg/L，而甲苯、苯乙烯在採樣中大多未檢出，雖然苯及乙苯仍超過地下水管制標準，但經過這一年的試驗，污染物濃度已大幅下降，在五個井位均呈現此趨勢，但乙苯及苯仍具高濃度，尤其乙苯仍是主要污染物，在地下水樣品中常有純相出現。24 小時長期灌注會增加吸附態及孔隙間殘留態污染物被地下水帶出</p> <p>6. 感謝建議，已補充於綜合討論中，由現場微生物指標顯示，無論是任一口監測井所採集之地下水，其細菌物種數皆隨著持續加入高溶氧水後逐漸增加，特別是靠近注入井 GW1 之 MW1 監測井(相距 0.3 m)，其地下水中細菌物種數增加速度與數量皆高於 MW2 監測井。菌相分析顯示同時加入高溶氧水可能促進同一類型菌種大量生長，而使得兩口監測井地下水中菌相差異度減小。石化污染物降解菌添加試驗，污染物濃度仍呈現下降，在五個井位均呈現此趨勢。</p>
<p>委員四</p> <p>1. 本計畫灌注高氧水到地下水中，期能提升好氧微生物降解效率，計畫已執行模場實驗，具實務應用參考性。</p> <p>2. 後續若有機會，建議能釐清灌注後硝酸鹽及磷酸鹽增加與注入菌液之關聯性，以作為配方及注入量限制的參考。</p> <p>3. 本計畫為兩年期計畫，本次報告為第二年期末報告。計畫中以高壓增加水中溶氧、注入地下後，使產品奈米氣泡，維持水中高溶氧方式，期能增加地下水中好氧生物作用。計畫完成溶氧氣泡水量測校正、管柱及砂箱實驗測試溶氧維持情形並利用模場實驗，測試溶氧傳輸及變化、微生物族群以及污染物濃度變化等。整體實驗成果豐富，技術新穎性高具實場應用性。</p> <p>4. 有關量測高濃度溶氧部分，建議能再進一步說明其準確度。</p>	<p>1. 敬悉。</p> <p>2. 感謝建議，由於計畫時間所限，未能進行灌注後硝酸鹽及磷酸鹽增加與注入菌液之關聯性，如有機會釐清此問題，相信能使結果更加完整。</p> <p>3. 感謝肯定。</p> <p>4. 本計畫使用使用德國 WTW 的手提式溶氧計 (Handheld Oxygen Meters) 來檢測溶氧量，本裝置偵測溶氧最高值可達 50 mg/L，除依照</p>



<p>5. 建議分析現有數據或是後續研究探討水中 BTEX 污染物，因揮發及生物降解各自移除的比例或可對於整治技術之掌握更具精確度。</p> <p>6. 研究中所提中結合奈米氣泡與臭氧注入也許更具有發展潛力，後續建議可以考慮進行相關研究。</p>	<p>廠商建議之校正方法外，溶氧測定部分樣品並分樣以 Winkler test 滴定法進行比較。</p> <p>5. 感謝建議。場址均有水泥或柏油鋪面污染物揮發可能較不易，污染物濃度大幅下降是灌注水稀釋及帶出純相污染物或生物降解作用何者貢獻較多甚難判斷。</p> <p>6. 感謝建議。</p>
<p>委員五</p> <p>1. 整體而言，期末報告進度符合預期且報告內容成果豐碩。</p> <p>2. 研究中利用 NGS 所得到的微生物族群分析資料所代表的意義為何應具體說明清楚，特別是所分析到的優勢微生物對此污染場址污染物降解的意義為何？目前報告中所提只是非常粗淺的說明，建議應加強此部分說明與解釋。</p> <p>3. 建議應針對微生物分析結果與現場水質參數資料進行統計分析以了解各參數彼此間的相關性。</p>	<p>1. 感謝肯定。</p> <p>2. 感謝建議，已補充於綜合討論中。</p> <p>3. 感謝建議，已補充於 4.8.4 節中。</p>
<p>專案主持人：   (簽名及蓋章)</p>	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐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	108 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它		主持人：陳士賢 NO：A9
計畫名稱	以超高溶氧奈米器泡水強化現地生物整治技術試驗計畫(二)		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一</p> <ol style="list-style-type: none"> 108 年度專案成果績效自評表填表日期應更新至本期中報告時間，非申請時。論文未發表，務必於期末前完成。 依既定進度表，本期應完成高濃度氣體溶解裝置建置及試車，建立高濃度氣體溶解裝置基本操作參數，以及以奈米氣泡水進行管柱及沙箱實驗，均如期完成，且有初步成果，值得肯定。 未來仍需確認高飽和溶氧水是否有效刺激地下環境中之微生物生長，才能降解目標污染物。以及所添加之油品分解菌添是否能加速降解污染物，期待能達成實場應用之目標。 		<ol style="list-style-type: none"> 感謝指正，已修正，本計畫為二年期期程，將於期末前發表論文。 感謝肯定。 感謝建議，本計畫透過評估不同灌注高溶氧水方式及每月評估菌相變化方式確認是否刺激微生物生長及加速污染物分解；下階段工作並包括添加油品分解菌，成果將於後續報告呈現。 	
<p>委員二</p> <ol style="list-style-type: none"> 績效自評表請更正填寫日期。 完成建立高濃度氣體溶解建置及試車。 請確認表 4-11、4-13 與表 4-16、4-17 相同地下水井水質檢測結果，數據差異過大的原因。 		<ol style="list-style-type: none"> 已修正。 敬悉。 本場址為運作中工廠，發現污染多年，且歷經多年整治，模場區域接近其中一污染熱區，因不同區塊及污染物種類分布在不同深度，因此地下水質會呈現較大變異。 	
<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 本研究主要進行超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治。藉由實驗室試驗以及污染場址模場試驗等開發土壤整治技術。 管柱實驗顯示溶氧的降低量，建議考量管柱的半徑可能造成的影響。 		<ol style="list-style-type: none"> 敬悉。 管柱實驗為第一年計畫第一階段成果，結果顯示高溶氧水在垂直管柱中傳輸會造成溶氧損失，注入水經滯留時間 24 hr 後所偵測到的溶氧值為 9.38 mg/L，在前二十四小時溶氧劇烈減少，從 27 mg/L 降至 9 mg/L，但此後溶氧減少就趨於和緩，滯留時間 120 hr 後所偵測的溶氧值 8.54 mg/L。由於管柱實驗就尺度及規模和實場不同，僅提供溶氧變化之基線資料。 	



<p>3. 建議根據管柱實驗溶氧量與距離的關係結果，進一步考量設計實場注氧的工程設計。</p> <p>4. 建議實場試驗時可以進一步建立菌種分布與溶氧量的關聯性，以實證本技術之效果以及未來的技術發展基礎資訊。</p>	<p>3. 管柱試驗僅用於參考評估溶氧傳輸距離、溶氧持續能力，2018年9月開始實場操作，有關注水頻率、注水量均依照現場操作條件及監測結果來調整至預期目標。</p> <p>4. 感謝建議，目前透過每月定期監測進行菌相分析，持續觀察高飽和溶氧水對好氧性分解菌之刺激作用，並於下階段實驗投入石化降解菌種後觀察菌相，將於後續期末報告呈現。</p>
<p>委員四</p> <p>1. 砂箱測試與實際模場應用評估之落差，宜於後續試驗以實際操作量測說明，並配合工法操作使預期效益能達成。</p> <p>2. 高溶氧在 pump 傳輸即不正常損耗，造成未能達預期高溶氧處理效能，應於後續探討改進方法。</p> <p>3. 建議高溶氧氣泡與菌相分析宜綜評，是否能營造有利生物降解穩定環境。</p> <p>4. 是否能符合預期申請新型專利，宜評估之。</p> <p>5. 專案執行進度符合期程與工作內容。</p>	<p>1. 砂箱試驗為去年之結果，砂箱試驗水文地質條件與污染場址不同，但為了解高溶氧水在砂箱孔隙介質中傳輸，在開放系統或密閉條件下之溶氧濃度對應時間期程之減少情形，對於模場操作，提供現場高溶氧水遞送及儲存之參考依據。</p> <p>2. 實場操作注水端及監測井溶氧濃度變化如報告中圖 4-28 所示，目前採用連續 24 小時注入高飽和溶氧水後，監測井 MW2 之溶氧有大幅度的提升，因此持續注入使高飽和溶氧水擴大溶氧影響半徑且能持久不消散，使溶氧得以維持在 10 mg/L 以上。</p> <p>3. 感謝建議，目前透過每月定期監測進行菌相分析，持續觀察高飽和溶氧水對好氧性分解菌之刺激作用，並於下階段投入石化降解菌種後觀察菌相，將於後續報告呈現。</p> <p>4. 將視本年度試驗結果進行評估專利申請事宜。</p> <p>5. 敬悉。</p>
<p>委員五</p> <p>1. 圖 3-5 上應標註井位代號，以釐清其相對位置。</p> <p>2. 請說明 4.2 節、4.3 節內容與第一年管柱試驗內容的差別。</p> <p>3. 砂箱實驗結果</p> <p>(1) 為何最遠端出口(8 號)之溶氧高於其前方之 4 號及 7 號篩管？</p> <p>(2) 如何應用於現地推估溶氧傳輸距離？</p>	<p>1. 已修正標註。</p> <p>2. 本計畫為二年執行期程，管柱實驗為第一年計畫第一階段成果，4.2 節、4.3 節皆為第一年管柱試驗結果，其兩節差異為飽和溶氧水及高飽和溶氧水之管柱試驗結果。</p> <p>3. (1) 本計畫為二年執行期程，砂箱實驗為第一年計畫第一階段成果，推估在沙箱試驗中 2 號及 5 號、3 及 6 號之處較接近源頭(1 號)故溶氧較高於 4 號及 7 號；8 號出口端之處無石英砂填充，得以與大氣中之氧氣平衡所致，故溶氧高於 4 號及 7 號。</p> <p>(2) 砂箱試驗水文地質條件與污染場址不同，但為了解高溶氧水在砂箱孔隙介質中傳</p>



	<p>輸，在開放系統或密閉條件下之溶氧濃度對應時間期程之減少情形，對於模場操作，提供現場高溶氧水遞送及儲存之參考依據。模場實驗已於 2018 年 9 月開始執行，實場操作注水端及監測井溶氧濃度變化如報告中圖 4-28 所示。</p>
<p>委員六</p> <p>1. 表 4-12、4-16 及 4-17，灌注高溶氧奈米水，依檢測數據來看，污染物濃度似有下降之效果，濃度下降之原因，是否為本計畫實驗目的，為高溶氧氣泡水所刺激生物菌，達到污染物濃度下降，或是為灌注水所造成濃度稀釋之現象。</p> <p>2. 請說明灌注高溶氧奈米水之有效範圍？</p> <p>3. 請說明油品分解菌，是否適合生存與高溶氧奈米氣泡水中？生命週期是否有變化？</p>	<p>1. 濃度下降可能為灌注水稀釋及微生物降解共同作用，後續將分析是否有石化污染物功能性降解酶基因序列出現及變化，來印證污染物降解的原因。</p> <p>2. 目前於實際模場中能夠觀測到於 GW1 灌注高飽和溶氧水後，能夠有效提高監測井 MW1 及 MW2 之溶氧，故推測傳輸範圍達一公尺以上。</p> <p>3. 多株油品分解菌為執行團隊從石油公司配銷所石化場址篩出，其中有 MTBE 降解菌，亦有 TPH 分解菌，多數為好氧菌及兼氧菌，過去曾用於 2011-2014 年屏東縣九如鄉九清段 1340 地號生物整治現地試驗用於分解石化污染物，是否適合生存與高溶氧奈米氣泡水中，目前正執行中將於後續報告呈現說明。</p>
<p>專案主持人： </p>	<p> (簽名及蓋章)</p>



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒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	108 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：陳士賢	
計畫名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫(第二年)		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一</p> <p>1. 建議先瞭解篩選模場的土壤質地剖面特性及水文地質特性，以確定是以因溶氧不足造成整治不良，目前提供資訊試驗模場之淺層土壤屬粉土質，深層土壤為砂質地，因此需要運用此技術於現地改善此問題，應有明確的模場的水分傳導度(soil hydroductivity)，土壤孔隙率(soil porosity %)評估。</p> <p>2. 依第一年的初步成果，如何提供奈米氣泡(高溶氧水)的濃度的技術仍需盡快解決，目前在試驗期間僅能維持 2 週，如何更久？影響半徑範圍為何？或如何作調控改變？</p> <p>3. 注入井提供奈米氣泡(高溶氧水)的濃度、方式、深度與位置等均會影響模場內土壤菌種的改變，進而影響後續監測油品分解菌種變化及生物降解污染物之效果，如何建立其關聯性分析評估？建議加強此方面考量。</p> <p>4. 目前砂箱試驗設計如何與模場條件(僅 5 m×5 m)一致？</p>		<p>委員一</p> <p>1. 感謝建議，本污染場址之土壤特性與地下水文相關資料、土壤質地、土壤孔隙率在剖面之分佈與地下水位變動等參數，在過去場址補充調查及進行整治期間均有量測，已參考場址控制計畫書，將補充於後續報告中，相關水文地質參數也作為注入高溶氧水施作參考。</p> <p>2. 模場試驗於 2018 年 9 月開始進行，高溶氧水初期規劃採用連續注入八小時，同步於鄰近監測井監測地下水溶氧，以了解高溶氧水其傳輸成效，第一個月灌注頻率為每日 8 個小時，其時間為 9 時至 17 時，第二個月每日灌注 12 小時，第三個月每日灌注 24 小時，將確認何種頻率對地下水中溶氧量的提高會有最佳效果，以求得最佳操作模式。</p> <p>3. 模場試驗啟動三個月，對於採用較長灌注時間或間歇性注入方式目前仍透過操作參數調整在嘗試評估中，污染場址之高溶氧水注入量、灌入深度將視操作條件穩定執行後紀錄及呈現於後續報告中，同時污染物濃度下降是因為高生物活性降解，還是注入水稀釋揮發所造成，灌注前之微生物菌相已進行分析作為灌注後之微生物菌相比較，將持續觀察。</p> <p>4. 砂箱試驗之水文地質條件與污染場址不同，但了解高溶氧水在砂箱孔隙介質中傳輸，高溶氧水分別在開放系統或密閉系統條件下之溶氧濃度，對應時間期程之溶氧減少情形，有助於模場操作時，提供作為現場高溶氧水遞送至地下環境之參考依據。</p>	



<p>委員二</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 主持人之學術研究能力與土水污染技術發展能力均佳，足以勝任本專案計畫。計畫主持人近五年的研究與土水技術發展績效亦佳。 2. 本專案計畫執行團隊學術研究能力與土水污染技術發展能力佳，本團隊足以勝任本專案計畫。本計畫團隊近年對土水污染相關計畫執行績效佳。 3. 本專案計畫對未來土壤及地下水污染整治工作推動有貢獻。 4. 依本計畫申請書中所列的成果與績效自評表可推知，本計畫執行所獲得的研究成果以論文發表為主，對國內土水污染領域的主要貢獻仍待藉由實務應用的成果加以驗證(例如計畫書中所述之技術轉移與實務應用驗證之案例)(模場試驗區域若有其他非試驗井，其監測數據建議彙整，以比對試驗井與非試驗井的異同)。 5. 本專案計畫書撰寫具體，研究方法具可行性。 6. 本專案計畫書執行後所獲得的研究成果對未來土水污染實場的實際應用性仍待進一步驗證(本年度的重點)。 7. 本專案計畫書中的文獻蒐集完整，計畫主持人對國內外本研究領域的現況了解。 8. 專案執行期限合理，計畫書中也已說明計畫執行的預期成果。 9. 本計畫為延續性計畫，本年度之前的歷年專案執行成果已有學術論文發表。 10. 本計畫書已依計畫構想審查委員意見調整(修正)。 	<p>委員二</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝肯定。 2. 敬悉。 3. 敬悉。 4. 本場址整治工程實務的應用性須待本年度模場試驗進行中參數及操作條件修正後，視結果進一步討論。 5. 敬悉。 6. 工程實務的應用性及技術移轉將視本年度模場試驗結果，進一步說明討論。 7. 感謝肯定。 8. 敬悉。 9. 敬悉。 10. 敬悉。
<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 欠缺計畫執行同意書，自我檢核表。 2. 期中報告時建議能對現地高溶氧水其傳輸之最佳操作條件說明。 	<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝指正，已補充計畫執行同意書及自我檢核表。 2. 模場試驗於 2018 年九月開始進行，高溶氧水初期規劃第一個月灌注頻率為每日 8 個小時，其時間為 9 時至 17 時，第二個月每日灌注 12 小時，第三個月每日灌注 24 小時，同步於鄰近監測井監測地下水溶氧，以了解高溶氧水其傳輸成效，將確認現地高溶氧水其傳輸之最佳操作條件，以求得最佳操作方式。



<p>3. 期末報告時請增加成本效益之分析。</p> <p>委員四</p> <p>1. 本研究擬結合奈米氣泡產生設備與臭氧產生機，具創新想法，建議本計畫可以增加這方面的研究與探討。</p> <p>2. 本研究模場試驗 I 擬分別以氧氣與氮氣作為高溶氧與低溶氧奈米氣泡產生源，建議補充說明此兩種產生源的氧濃度範圍。</p> <p>3. 模場研究 II 擬進行質量平衡計算，此部分難度頗高，建議僅需針對石油碳氫化合物的降解效果進行評估即可。</p> <p>4. 模場測試時，建議加強安全問題的工作。</p> <p>委員五</p> <p>1. P.15 以攜帶式顆粒分析設備量測奈米氣泡水於土壤孔隙介質的傳輸情況，如何進行量測並排除土壤顆粒的干擾？</p> <p>2. 模場井位規劃距離相距僅 1.5 公尺，不易評估奈米氣泡的傳輸距離與有效半徑，建議作適當的調整。否則模場抽、注高溶氧奈米氣泡水的水量大，需考量並確認污染物濃度減少是因氧化而非注入水稀釋所致。</p> <p>3. 抽出水如何處理？現場是否有適當的處理單元設施？</p> <p>4. 地下水微生物 NGS 分析費用第二年比第一年貴 50% 的原因？</p>	<p>3. 模場試驗於去年九月開始進行，高溶氧水初期規劃採用連續注入八小時，第二個月每日灌注 12 小時，第三個月調整為每日灌注 24 小時，同步於鄰近監測井監測地下水溶氧，以了解高溶氧水其傳輸成效，期末報告時將增加成本效益之分析。</p> <p>委員四</p> <p>1. 本計畫使用之小型奈米氣泡產生機，其高濃度氧的產生機制係生產者專利，微米氣泡或奈米氣泡的生成為多孔性薄膜產生方式，奈米氣泡溶氧試驗使用純氧，臭氧產生機係整治單位擬規畫使用於場址之整治工法，並未在本計畫執行區域使用。</p> <p>2. 奈米氣泡溶氧試驗使用純氧，目前未使用氮氣。</p> <p>3. 感謝建議，計畫規劃為提高溶氧至過飽和濃度希望在高溶氧地下孔隙環境中，刺激好氧性微生物生長以協助分解本場址之目標污染物(苯、甲苯、乙苯)，將以評估目標污染物的降解效果為主。</p> <p>4. 感謝建議，本場址為石化廠工業安全衛生要求極為嚴格，將強注意安全。</p> <p>委員五</p> <p>1. 本研究以溶氧為指標，因此量測地下水中溶氧濃度，對於奈米氣泡水的流布情況透過各監測井其溶氧測定以進行了解。</p> <p>2. 受限核定經費，模場又必須設置多口監測井及注水井，同時考量高溶氧水有效影響半徑是否能及於大面積區域施作，因此本計畫模場井位規劃距離相距 1.5 公尺。場址中目標污染物(苯、甲苯、乙苯)多存於孔隙介質中，並非以溶解態存在，雖然目標污染物(苯、甲苯、乙苯)在有機污染物中屬溶解度較高，模場進行抽注高溶氧奈米氣泡水，非屬大量，應不會提升污染物在地下水中濃度。</p> <p>3. 抽出水在本場址均經場內設置之廢水處理單元妥善處理。</p> <p>4. NGS 分析費用係誤植已修正，現場工作地一年下半年始進行，因此第二年分析樣品數量將較多。</p>
---	--



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐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	107 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：陳士賢	
計畫名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 高溶氧水在砂箱試驗及開放或密閉條件下之溶氧濃度確實會明顯減少，此結果如何應用於模場試驗？如何改善？是否有必要？ 2. 建議污染場址之土壤特性與地下水文相關資料，此對於未來實場評估，如土壤質地、土壤孔隙率在剖面之分佈與地下水位變動等。 3. 高溶氧水在現地模場試驗在過去 2 個月之成效並先評估生物降解之效益？在多氣泡條件下配合土壤質地分佈是否有效？是否有必要連續注入或更好的調整？		委員一 1. 誠然砂相試驗之水文地質條件與污染場址不同，但為了解高溶氧水在砂箱孔隙介質中傳輸，在開放系統或密閉條件下之溶氧濃度對應時間期程之減少情形，對於模場操作，提供現場高溶氧水遞送及儲存之參考依據。 2. 本污染場址之土壤特性與地下水文相關資料、土壤質地、土壤孔隙率在剖面之分佈與地下水位變動等將參考控制計畫書及量測後補充於後續報告中。 3. 模場試驗於九月開始進行，高溶氧水初期規劃採用連續注入八小時，同步於鄰近監測井監測地下水溶氧以了解高溶氧水其傳輸成效，對於採用較長灌注時間或間歇性注入方式目前仍透過操作，在嘗試評估中。灌注前之微生物菌相已進行分析作為灌注後之微生物菌相比較。	
委員二 1. 期末報告對研究計畫的執行現況、研究流程及方法說明具體完整。 2. 計畫後續執行工作項目及內容已於報告書中第 59 頁說明（第二年度），並已提出相關建議。 3. 計畫執行進度與預定進度大致相符，計畫執行進度並無落後。 4. 期末報告所說明的研究內容與原計畫目的大致相符。 5. 根據期末報告內容所提出之討論與建議合理，但是否能具體的應用於整治工程實務上，仍待本年度模場試驗結果的進一步說明討論。		委員二 1. 敬悉。 2. 敬悉。 3. 感謝肯定。 4. 敬悉。 5. 模場試驗於九月開始進行，高溶氧水初期規劃採用連續注入八小時，同步於鄰近監測井監測地下水溶氧，以了解高溶氧水其傳輸成效，對於後續是否採用較長灌注時	



6. 期末報告所說明的整體研究成果符合預期，但工程實務的應用性（與應用對象）仍待說明討論。其中的關鍵是「必要性」仍待說明，例如：提高溶氧至過飽和的目的為何？降低氣泡粒徑以利於傳輸的驗證…等，建議討論。

7. 本研究計畫的學術產出及活動、人才培育符合預期。

8. 本計畫的研發成果在獲得專利、技術轉移…等仍待持續評估。

9. 本計畫對國內土壤地下水污染領域的研究發展有所助益。

委員三

1. 自評表請更正為 107 年度專案成果。

2. 第 22 頁圖 3-4 有關模場試驗預定執行位置，請標示清楚。

3. 現場之地質水條件不同，且土壤粒徑不同，高溶氧水維持能力是否有測試與實驗室相同。

4. 簡報資料 9 月地下水監測資料中，乙苯濃度很高，到 11 月地下水監測結果乙苯濃度降低很多，建議討論有效降低的相關因素貢獻情形。

委員四

1. 建議補充奈米氣泡的大小檢測數據。

間、或間歇性注入方式、或多井灌注以單井抽除以提高影響半徑，目前仍在試驗評估中。

6. 工程實務的應用性須待本年度模場試驗進行中參數及操作條件修正後，視結果進一步討論。提高溶氧至過飽和濃度目的為希望在高溶氧地下孔隙環境中，刺激好氧性微生物生長以協助分解本場址之目標污染物(苯、甲苯、乙苯)，而降低氣泡粒徑係希望溶氧可以在地下水環境中維持較高濃度及較久時間。俟模場試驗具體結果會加以討論。

7. 感謝肯定。

8. 研發成果、專利、技術轉移將俟模場試驗具體結果以評估其方式。

9. 工程實務的應用性及技術移轉將視本年度模場試驗結果，進一步說明討論。

委員三

1. 已更正。

2. 已標示圖 3-4 模場試驗執行位置示意圖中，藍色區域為模場試驗區域。

3. 模場試驗於九月開始進行，高溶氧水初期規劃採用連續注入八小時，同步於鄰近監測井監測地下水溶氧，以了解高溶氧水其傳輸成效，對於後續採用較長灌注時間、或間歇性注入方式、或多井灌注以單井抽除以提高影響半徑，目前仍在試驗評估中，以求得最佳操作模式。

4. 模場區域中目標污染物仍甚高，9 月地下水監測資料中乙苯濃度超過其飽和溶解度顯示污染場址仍具有殘留相存在，11 月地下水監測結果乙苯濃度降低很多，據推測並非整治成效而是地下水採樣時沒有採樣到乙苯殘留相，將持續觀察目標污染物濃度之變化。

委員四

1. 奈米氣泡大小之量測需倚賴儀器，如顆粒追蹤分析(particle tracking analysis method)、電阻測定方法(electrical resistance method)、雷射分散式散射法(laser diffraction scattering



method)或動態光散射粒徑分析，雖未直接量測，但本計畫量測水中溶氧濃度，畢竟產生高溶氧水並將其有效地送至污染區塊才是本計畫訴求。

2. 奈米氣泡溶氧試驗是否使用純氧。
3. 建議補充圖 2-2 實測實驗的條件。
4. 建議補充說明奈米氣泡在環境中可以維持的時間。
5. 本研究以溶氧為指標，監測奈米氣泡水的流布情況。建議補充說明兩者之間的相關性。
6. 圖 3-2：管柱實驗的條件對於氧溶解量，以及現場整治時的條件的氧溶解量可能不同，建議考量兩者之間的差異性。
7. 本研究所使用之高濃度氣體溶解裝置之水之飽和溶氧量最高可達 55.3mg/L，而氧的飽和濃度為 9.03mg/L。請補充說明達到此高濃度氧的產生機制。
8. 建議未來可以針對不同深度之地下水溶氧量進行偵測。
9. 建議未來可以探討高溶氧量對於土壤中菌種之影響。

委員五

1. 污染場址之高溶氧水注入量、灌入深度等請補充說明，並確認污染物濃度下降是因為高生物活性降解，還是注入水稀釋揮發所造成。

2. 奈米氣泡溶氧試驗使用純氧
3. 圖 2-2 為先導試驗的溶氧提升能力測試，經過 30 分鐘的曝氣與水循環，可將 250L 自來水中的溶氧從 7.3 mg/L 提升至 20 mg/L，經過 5 天的靜置，曝氣後的自來水溶氧仍然可以維持 11 mg/L。
4. 管柱實驗顯示高溶氧水在垂直管柱中傳輸會造成溶氧損失，注入水經滯留時間 24 hr 後所偵測到的溶氧值為 9.38 mg/L，在前二十四小時溶氧劇烈減少，從 27 mg/L 降至 9 mg/L，但此後溶氧減少就趨於和緩，滯留時間 120 hr 後所偵測的溶氧值 8.54 mg/L。砂箱實驗顯示注水點溶氧值為 40.2 mg/L，經 16 天後溶氧降至 7.83 mg/L，末端監測點溶氧值為 17.2 mg/L，經 16 天後溶氧降至 6.72 mg/L。實場溶氧之傳輸有效性及滯留時間正進行評估中。
5. 本研究以溶氧為指標，監測奈米氣泡水的流布並非計畫目的。
6. 管柱實驗就尺度及規模和實場不同僅提供溶氧變化之基線資料。
7. 高濃度氧的產生機制係生產者專利
8. 感謝建議納入規劃
9. 高溶氧量對於土壤中菌種之影響

委員五

1. 模場試驗方啟動一個月，對於採用較長灌注時間或間歇性注入方式目前仍透過操作，在嘗試評估中，污染場址之高溶氧水注入量、灌入深度將視操作條件穩定執行後紀錄及呈現於後續報告中，同時污染物濃度下降是因為高生物活性降解，還是注入水稀釋揮發所



2. 以目前小尺度的實驗成果，建議估計實廠操作之灌注條件及有效半徑，及現地使用為點批次灌注的效益。
3. 水質參數測出 EC 為負質的意義？

土污基管會

1. 建議將第四章標題改為「執行方法與成果」，第五章改為「結論與未來工作重點」較為合適。

造成，灌注前之微生物菌相已進行分析作為灌注後之微生物菌相比較，將持續觀察。

2. 匯集模場試驗成果後將建議實廠操作之灌注方式、條件及有效半徑，及進行效益評估。

3. 表 4-11 中地下水監測顯示 5 個採樣點之地下水水位為 2.07—2.33 米，而而 EC 之測值則為 435—909 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

土污基管會

1. 感謝建議，已修正。



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐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	107 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他		主持人：陳士賢
計畫名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一</p> <p>1. 期中報告對計畫執行現況、流程及方法已具體說明。</p> <p>2. 本計畫無自籌款。</p> <p>3. 期中報告對本計畫後續執行工作項目已說明(p. 45)。</p> <p>4. 計畫執行進度與預定進度相符，並未落後。</p> <p>5. 期中報告顯示計畫研究內容與原計畫目的相符。</p> <p>6. 期中報告的初步成果顯示，依據原計畫設計與初步成果所提出之討論與建議合理。</p> <p>(1) 過飽和溶氧是否易有氣泡生成(以氣體型態逸散致浪費了溶氧?) (微細氣泡反而可能阻塞地下水移動?)? 表 4.9，前一週，幾乎均處於過飽和 (DO 與所處深度的關係? 不同深度的壓力下的 DO?)。</p> <p>(2) 管柱試驗的侷限環境與實務上開放環境對 DO 遞減速率(影響傳輸距離)是否一致? 建議討論。</p>		<p>委員一</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 敬悉。</p> <p>3. 敬悉。</p> <p>4. 敬悉。</p> <p>5. 敬悉。</p> <p>6. 感謝委員肯定。</p> <p>(1) 高溶氧生成機在產生高溶氧水時，依據現場操作觀察奈米氣泡其尺寸甚小，且會快速溶於水中，因土壤孔隙較奈米氣泡尺寸為大，因此在現階段實驗室管柱實驗中，並無阻塞地下水移動情形，未來在實場操作上，將持續觀察是否會造成對地下水流場改變之潛勢。表 4.9 顯示為對照實驗，其設計為了解水中高溶氧分別在開放與密閉環境條件下衰減情形，水中高溶氧 35-40 mg/L 在 48 小時減少最快，約於一週期程衰減至略高於飽和溶氧之濃度 9-9.5 mg/L，之後維持飽和溶氧狀態，深度及壓力對 DO 影響，將於目前正執行之污染場址實場中觀察記錄，未來可進行比較及探討。</p> <p>(2) 管柱實驗及砂箱實驗並無法與污染場址水文及地質環境雷同或相似，但其目的為了解在良好控制條件下(均質孔隙介質、穩定地下水流速及溫度)超高溶氧水之溶氧濃度對應時間及距離變化，提供基線資訊，因此並無與實場比較之必要，實場 DO 遞減速率於現場灌注施作將進行比較及探討。</p>	



<p>7. 期中報告的初步成果顯示，目前的研究成果符合原計畫書所預期的成果。</p> <p>8. 期中報告的初步成果顯示，本計畫已有初步研究成果，報告中尚未說明研究生或助理參與試驗。</p> <p>9. 期中報告已有初步成果，本成果是否可獲得專利或技術轉移，尚待未來期末報告中說明。</p> <p>10. 期中報告已有初步成果，本研究可提升國內土壤與地下水污染整治技術與應用，符合政策。也可提升國內土水整治事業的發展，對社會經濟發展有助益。</p>	<p>7. 感謝委員肯定。</p> <p>8. 本計畫於實驗室建立奈米氣泡水量測技術，設立及試車高濃度氣體溶解裝置，比較二種溶氧計偵測溶氧，管柱實驗及砂箱試驗，均由兩位碩士班研究生協助，污染場址實場工作由專任助理、研究生及業興公司協助執行。</p> <p>9. 本計畫為兩年期計畫，除環保署定期每兩個月成效評估及執行團隊之自我成效檢核外，未來在技術轉移、國際期刊發表或進行專利申請(則須排除國際期刊發表)，將視計畫成果決定其形式，並於期末報告中述明。</p> <p>10. 感謝委員肯定。</p>
<p>委員二</p> <p>1. 請補充說明奈米氣泡水量測技術之穩定性及可靠度？其中溶氧測定之準確性，亦應予以說明。</p> <p>2. 請補充說明於管柱試驗，溶氧量變化之影響因素，改善溶氧量變化(減少)之作為為何？</p> <p>3. 未來應用於現地生物整治技術時，如何有效控制為超高溶氧之奈米氣泡，應有較為完善之驗證機制。</p>	<p>委員二</p> <p>1. 量測溶氧係作為污染場址實場灌注高溶氧水時之參數，高濃度氣體溶解裝置生產高溶氧水可於30分鐘將300公升水中之溶氧提升至40 mg/L 以上，溶氧量測係使用德國WTW 的手提式溶氧計(Handheld Oxygen Meters)，本裝置偵測溶氧最高值可達50 mg/L，除依照廠商建議之校正方法外，溶氧測定除使用溶氧計外部分樣品分樣以Winkler test 滴定法進行比較。</p> <p>2. 管柱試驗目的為提供基線資料，觀察不同滯留時間下其溶氧變化，溶氧量變化之影響因素可能包括地下環境孔隙度、地下水水位高度，並不擬規畫改善管柱試驗中溶氧量損失，面對污染場址水文地質條件不同，將透過不同高溶氧水灌注方式，以了解溶氧量在地下環境之變化，視操作情形作為改善高溶氧損失之策略擬定參考。</p> <p>3. 實場操作將透過不同高溶氧水灌注方式(灌注水量、灌注時間)以了解溶氧量變化，抽取井地下水溶氧濃度將作為修正灌注方式、評估影響半徑擬定參考。</p>



<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 數據呈現似有前後矛盾之處，表 4-4 顯示高溶氧水於製程時間為 30 分鐘時可得最高溶氧值為 40.9 mg/L，延長製程時間並無法提升溶氧量，但表 4-5 與表 4-6 卻分別出現 45.6 與 47.4 mg/L 的溶氧值，是否合理？ 水平及垂直管柱之溶氧變化(表 4-5 與表 4-6)顯示飽和溶氧水經過 pump 後溶氧值即明顯下降，原因為何?如何克服? 	<p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> 高濃度氣體溶解裝置目前在國內多用於養殖業，在本實驗室試車階段會有溶氧高低起伏，最高可將水中溶氧提升至 50 mg/L，但基本上執行團隊經多次測試，發現最佳操作條件是 30 分鐘使 300 公升水溶氧提升至 41 mg/L 為最經濟方式，表 4-5 與表 4-6 為當時生產兩批次含氧水其濃度較高，分別達 47.4 mg/L 與 45.6 mg/L。仍在本裝置提升溶氧範圍內 飽和溶氧水經過 pump 後溶氧值即明顯下降，原因可能為水經 piston pump 造成溶氧逸散，因為此部分為實驗室工作，本團隊並不計畫克服此問題，實場水量注入量較大若有類似溶氧逸散問題再予以克服。
<p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> 宜由目前砂箱溶氧傳輸結果，於實際模場如何規劃論述之。 依試驗結果是否符合預期規劃與效益？ 	<p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> 管柱實驗及砂箱實驗對於水中其溶氧變化對應時間及距離提供基線資訊，特別是水中溶氧衰減情形，污染場址實際灌注將透過監測以了解其傳輸後溶氧變化情形，並評估影響半徑以作為修正及調整灌注方式之操作參考。 管柱實驗及沙箱實驗使團隊獲得水中溶氧變化對應時間及距離之基線資訊，作為目前進行之實場規劃之參考。
<p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> P.10-15 圖解析度得提升，P.14、P.19 圖號誤植。 進度符合規劃。 選用 0.01N CaCl₂ 沖洗管柱 4hrs 模擬飽和層之原因？(與一般背景電解質的組成不甚相同)。 能否由目前管柱實驗結果估算實場可達之 ROI？ 	<p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> 已修正。 敬悉 0.01N CaCl₂ 可破壞土壤離子強度及聚集程度 將透過污染場址實場實際灌注工作來估算溶氧變化情形，並評估影響半徑 ROI。



<p>委員六</p> <ol style="list-style-type: none">1. 請說明超高溶氧奈米氣泡水對強化生物之效果如何？2. 本計畫之實驗室試驗似乎皆只注重奈米氣泡水之溶氧情形，建議可加入生物菌群模擬於地面下之狀態，觀察生物去除污染物效果如何？	<p>委員六</p> <ol style="list-style-type: none">1. 透過污染場址實場工作菌相分析，評估灌注高溶氧水後對應時間場址之菌相變化情形。2. 實驗室土壤中菌相與污染場址不同，實驗室模擬菌相變化工作因分子生物花費龐大，且在微生物多樣性及變異性下，所模擬條件除主要菌種外，無法與場址類似但本計畫經費被大幅縮減，故將直接進行污染場址菌相變化觀察高溶氧條件下對好氧性分解菌之刺激作用。
--	---



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

107 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

計畫書審查意見表

專案主持人：陳士賢	服務單位：國立高雄師範大學生物科技系(所)	模場類 05
專案名稱：以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
<p>委員一</p> <p>1. 建議宜增加滲透性差之坩黏土作為評估試驗，以利能應用在對溶氧需求高之整治場址。</p> <p>2. 本研究第一年為實驗室砂箱之型模場，另地下水菌相分析費用高達 270 萬，建議經費宜大幅調降。</p>	<p>1. 針對國喬化工場址將嘗試尋找是否有坩黏土污染區域以進行試作，唯試驗位置、場址受限於計畫徵求書內容規範與限制而無法任意選擇，且核定費用不足以支應額外之現場工作執行，將視實際情況而定。</p> <p>2. 本計畫第一年規劃為為實驗室砂箱試驗及污染場址實作，並非只有砂箱實驗。為了解高氧奈米氣泡對污染場址土壤及地下水菌相改變及影響，因此本計畫規劃應用次世代定序 (Next Generation Sequencing, NGS)，透過 NGS 對於地下環境(土壤及地下水)菌相之消長及改變進行通盤了解，由於分子生物其實驗材料均很昂貴，因此造成本計畫編列費用較高，大幅調降只是造成本計畫無法照原規劃及規模執行，因為分子生物實驗藥品、試劑、test kit 往往花費龐大，不是單純只涉及工程設計。</p>	



委員二

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 主持人(執行團隊)的學術研究能力與技術發展能力足以勝任本計畫。 2. 主持人(執行團隊)近五年研究與技術發展績效佳。 3. 本專案對未來土壤及地下水污染調查及整治工作推動的貢獻仍待本計畫未來執行成果的呈現與說明(本計畫屬於模場試驗計畫，補助經費較高，研究成果在實務應用性的說明應更具體完整)(尤其是採此系統的場址所需的關鍵條件為何?)(若只是為了增加 ROI，本系統與增設注氣井有何差異?)(增加溶氧的必要性，建議討論。溶氧過飽和是否必要?溶氧的利用速率與供應速率間的關係建議討論)(生物分解與供氧速率間的關係建議討論)(短時間顯著提高地下水中溶氧對生物整治的效益?建議討論)(研究成果在實務應用性的說明應更具體完整)。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝肯定 2. 敬悉 3. 本研究應用奈米級氣泡進行整治技術開發，期望應用新穎技術以提升我國污染整治技術水準。在實務應用上，預期應用奈米級氣泡的特性來突破氣體於地下環境中傳輸的問題。AS 搭配 SVE 方法，是將大量氣體注入地下環境中，任由氣泡自行傳輸，透過揮發性污染物於氣相、溶解相與吸附相的分配，使污染物進入不飽和層中，再由 SVE 抽除，僅為物理機制，其成效受限於氣泡傳輸的影響範圍。而本計畫擬採用奈米級氣泡顆粒小、穩定而略帶負電的特性，配合水力控制系統，使得氣泡進入土壤間隙中傳輸，而強化氣體於地下環境中的傳輸，使得氣體得以與污染物及微生物有更多的接觸，而擴大好氧生物整治作用。相較於 AS 方法，ROI 受到的氧氣的傳輸效率與地質構造的影響，奈米氣泡則可以透過水力控制方式達到氧氣傳輸效果，且預期可使氧氣進入一般氣泡無法進入的土壤間隙中，而使本技術得以應用於地下水傳輸情況較差的土壤質地或複雜的地質組成上。然而溶氧的增加造成的氧分壓，對於微生物的生長與污染物降解效率的影響，或需要配合其他的方法來控制微生物的生長，則需要在本研究中進行探討。在未來應用上，奈米級氣泡可以嘗試整合其他種類氣體，如臭氧，嘗試強化現地化學氧化的效果，亦可作為未來研究的課題。本研究將區分 2 個階段，首先利用實驗室沙箱試驗進行效率的測試，於此階段可利用不同土壤質地的組成與構造，尋找最佳的操作條件。第二階段則於實場中進行測試，驗證實驗室所建立的操作條件，並建立模組化系統，以做為未來大規模實場應用的基礎。 |
|---|--|



<p>4. 本專案預估之成果績效包含論文發表(研討會或期刊論文)(本計畫屬於模場試驗計畫，研究成果的實務應用性相對關鍵)。</p> <p>5. 本研究計畫書撰寫具體。</p> <p>6. 本研究計畫書所擬定的研究方法可行。</p> <p>7. 本研究計畫書所擬定的研究內容與所預期的研究成果，對未來土壤或地下水污染場址調查整治(或評估)的實場應用性仍待說明(計畫書中對研究成果的實務應用性的說明仍不具體，有待未來執行成果的說明)。</p> <p>8. 本研究計畫書的文獻蒐集尚完整，對國內外本研究領域的現況了解。</p> <p>9. 本研究專案執行期限合理。</p> <p>10. 本研究計畫書中對研究的預期成果已說明，但對實務應用性的說明卻不具體。</p> <p>11. 本計畫並不是延續性計畫。</p> <p>12. 本研究計畫對預期成果的呈現說明以學術發表、技術轉移、專利取得為主。</p>	<p>4. 敬悉</p> <p>5. 敬悉</p> <p>6. 敬悉</p> <p>7. 對整治場址的應用性，將依計畫產出進行成效評估</p> <p>8. 敬悉</p> <p>9. 敬悉</p> <p>10. 在實務應用上，預期應用奈米級氣泡的特性來突破氣體於地下環境中傳輸的問題。AS 搭配 SVE 方法，是將大量氣體注入地下環境中，任由氣泡自行傳輸，透過揮發性污染物於氣相、溶解相與吸附相的分配，使污染物進入不飽和層中，再由 SVE 抽除，僅為物理機制，其成效受限於氣泡傳輸的影響範圍。而本計畫擬採用奈米級氣泡顆粒小、穩定而略帶負電的特性，配合水力控制系統，使得氣泡進入土壤間隙中傳輸，而強化氣體於地下環境中的傳輸，使得氣體得已與污染物及微生物有更多的接觸，而擴大好氧生物整治作用。相較於 AS 方法，ROI 受到的氧氣的傳輸效率與地質構造的影響，奈米氣泡則可以透過水力控制方式達到氧氣傳輸效果，且預期可使氧氣進入一般氣泡無法進入的土壤間隙中，而使本技術得以應用於地下水傳輸情況較差的土壤質地或複雜的地質組成上。此外，奈米級氣泡可以嘗試整合其他種類氣體，如臭氧，嘗試強化現地化學氧化的效果，亦可作為未來技術發展方向。</p> <p>11. 本計畫為新研提計畫。</p> <p>12. 本計畫以技術轉移、專利取得為主。</p>
--	--



13. 本研究計畫已依原計畫構想書時的審查意見修正	13. 敬悉。
<p>委員三</p> <p>1. 所篩選模場及其試驗對象，應先確認是受限於溶氧或氧氣供應量不足所造成之整治成效阻礙。</p>	<p>1. 本研究主要目標乃建立奈米氣泡整治技術，故在場址選擇上以技術可行性之試驗為主要選擇方向，並以場址同意本研究執行為第一優先。模場試驗選擇之場址，其地下水傳輸情形較佳，其水力控制方法之執行較為容易，此外，場址同時有多種整治技術執行，包含傳統之SVE/AS方法與生物整治方法，可與本研究結果進行比對，以確認本技術之成效。而受到補捐助計畫對場址之要求，需先取得場址同意，為本研究之基本限制，未來如環保署可媒合其他受限於溶氧或氧氣供應不足等整治成效受阻礙之場址，並取得場址同意書前提下，本研究團隊樂意調整本計畫內容於該場址進行試驗。</p>
<p>委員四</p> <p>1. 本計畫對於現地應用時，超高溶氧奈米氣泡之驗證與傳輸行為並未詳加說明。另超高溶氧之定義為何？應有明確之量化參考數值。</p> <p>2. 對於生物降解反應過程，除計畫內容所欲控制溶氧傳輸之影響外，微生物種類及相關環境因子等因素，均會影響生物降解有機物之成效，本計畫於現地試驗如何釐清與評估？</p>	<p>1. 本研究原則上依據奈米氣泡水特性，可以使水中溶氧大量增加，初步定義產生之奈米氣泡水可以使水中溶氧過飽和，並達到 1.5 倍飽和溶氧濃度以上，稱之為超高溶氧。在沙箱與現地試驗上，原則上可應用 2 種方式證明奈米氣泡水之傳輸效果；(1)可利用手持式溶氧計監測不同深度地下水中溶氧值變化，接著可嘗試以氮氣作為奈米氣泡產生機的產氣來源，此時應可觀察到水中溶氧從原本的高溶氧轉為厭氧狀態，用以確認高溶氧水傳輸情況。(2)本計畫擬應用一攜帶式奈米粒徑分析儀，量測水中的顆粒，可有效區隔大型顆粒與奈米顆粒，以確認地下水水中的顆粒分布狀態。</p> <p>2. 本計畫選定之場址目前正執行 SVE/AS 等工法，可透過其他工法執行區域、無執行整治之區域的地下環境微生物監測、有機物濃度監測、水質參數監測等，與本研究執行區域之監測結果比較，以確認本研究設計之成效。</p>



<p>3. 生物反應過程之供氧量，亦是影響反映成效之重要因子，應列入計畫中討論。</p>	<p>3. 敬悉</p>
<p>本署意見</p> <p>1.第一年雜費編列超過 5%，請修正。</p> <p>2.經費未依徵求書規定分兩年編列，請修正。</p> <p>3.請於計畫書修定稿中補充說明與協同主持人之合作方式。</p>	<p>1.已修正</p> <p>2.已修正</p> <p>3.計畫主持人進行規劃計劃方向及實驗設計、進度追蹤及計畫報告撰寫，本場址目前由業興公司進行整治中，因此為確保不干擾整治工作又須兼具模場試驗進行，將由協同主持人規劃現場工程設計、現場工作進度查核及計畫協調。</p>



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

構想書審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他		主持人：陳士賢 NO：29
計畫名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 測試奈米氣泡達 20 mg/L 之環境是否過飽和？作奈米製造耗能？提供多少奈米氧可在飽和層或未飽和層之停留時間？		1. 傳統 Air Sparging 的影響半徑(ROI)較小，且大部分的機制是使揮發性有機物 VOC 揮發，而非生物降解。本計畫擬供應奈米氣泡水的目的是希望藉由奈米氣泡及水力控制，期使氧氣擴散距離更遠，提供地下環境多的溶氧及較佳之耗氧環境，有助於好氧之石化分解菌之增生，具有 enrichment 之概念。奈米氧可在飽和層或未飽和層之停留時間將先透過管柱及沙箱實驗進行評估，並在污染場址現地實作了解其滯留時間。	
2. 對砂箱、管粒與奈米氣泡注入對現地差異及對生物是否對微生物有負影響？		2. 砂箱試驗原則上會設法模擬場址水文情況進行，但微生物因生物多樣性因素並非其主要目的是確認奈米氣泡水的傳輸，並建立可行之監測方法。高濃度溶氧或奈米氣泡是否對微生物有負面影響，亦為本計畫先進行砂箱試驗的目的，惟已有許多奈米氣泡應用於廢水處理上，增加活性污泥處理效果的應用，對好氧微生物的影響應較低。	
3. 灌注或阻隔效應？		3. 本計畫於砂箱試驗與模場試驗均已設計抽、注井，以控制地下水流動，確認奈米氣泡水的分散情況，灌注效應類似地下水循環井之概念，此外將依據場址特性與需求，必要時設置鋼板樁阻隔，避免試驗過程與其他污染區域發生交互影響。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

構想書審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：陳士賢 NO：29	
計畫名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員二			
1. 瞬間供應過量的溶氧的必要性?	1. 由於傳統的 AS 大多採用細氣泡產生器，並由井篩傳輸至環境中，因此影響半徑較小，本計畫利用奈米級氣泡供給氧氣，期望奈米氣泡可傳輸至更遠的位置，提供微生物分解污染物所需要的氧氣，並促使石化分解菌生長較快，族群數量較多，土壤中存在的有機物或離子，預期可能會消耗溶氧，因此本計畫透過砂箱試驗及模場試驗進行奈米氣泡水於環境中傳輸的研究同時，研究對微生物之影響。		
2. 過飽和溶氧所致的氣體性(尤其是微氣泡於細顆粒土壤中)阻塞，建議評估。	2. 感謝委員提醒，奈米級的氣泡特性與傳統曝氣的氣泡特性不同在於氣體顆粒較小，帶負電荷，因此接觸面積較大，理論上較容易於地下環境中傳輸，與傳統細氣泡機產生之氣泡不同，本計畫將應用砂箱及模場試驗進行研究，確認本技術的可行性，並研判可能造成的孔隙阻塞及因應之道。		
3. 傳輸是一般整治的最主要限制因子，本計畫所擬探討的 K 值約 10(E-2) — 10(E-4) cm/sec，就整治而言，傳統的技術足以勝任，本計畫所擬克服的因子(或不當的實場條件)為何?	3. 擴大影響範圍及營造微生物 enrichment 是本計畫訴求，由於傳統的氣提法大多採用細氣泡產生器，並由井篩傳輸至環境中，因此影響半徑較小，本計畫利用奈米級氣泡供給氧氣，期望奈米氣泡可傳輸至更遠的位置，滯留時間較長提供微生物分解污染物所需要的氧氣。		
4. ROI?	4. 影響半徑需經過試驗後才能得知。惟奈米氣泡之分散乃透過水力控制，預期影響半徑將較傳統 Air Sparging 大。		
5. 經費編列過高。	5. 為了確保模場試驗區域與場址整治區之隔離，避免影響原訂整治計畫之工作，本計畫擬租用鋼板樁、並重新設井，配合定期採樣分析工作，故費用已經過合理計算，並無過高之虞。		



<p>6. 以傳輸而言較具意義，以供氧而言則須討論。</p> <p>7. 建議討論氧需求及氧供應。</p> <p>8. 此研究的經濟性必要條件需評估。</p>	<p>6. 感謝委員意見，本計畫利用奈米級氣泡供給氧氣，期望可利用奈米氣泡顆粒小、帶負電荷的特性，藉由水力控制可傳輸至更遠的位置，提供微生物分解污染物所需要的氧氣。</p> <p>7. 感謝委員意見，土壤中存在的有機物或離子，預期可能會消耗溶氧，因此本計畫透過砂箱試驗及模場試驗進行奈米氣泡水於環境中傳輸的研究，探討氧氣供給與需求的特性，同時，研究對奈米溶氧水對於微生物之影響。</p> <p>8. 感謝委員建議，本計畫於模場試驗過程，將評估與計算其能耗、氣體消耗量及總體費用，並與傳統 SVE/AS 的費用進行比較。</p>
---	---



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

構想書審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：陳士賢 NO：29	
計畫名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員三			
1. 既有目標場址，第一年所有之設計操作條件，應依據實場來設計、以利所取得參數能順利於第二年在模場使用。		1. 本計畫將依據管柱試驗設計了解奈米氣泡水於飽和層之滯留時間、影響範圍、溶氧濃度範圍等參數，以應用於第二年模場之實作。	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

構想書審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：陳士賢 NO：29	
計畫名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員四			
<p>1. 本計畫特色為超高溶氧奈米氣泡之形成與應用，惟計畫中未具體說明如何驗證於現地應用時，確實產生超高溶氧之奈米氣泡？</p> <p>2. 奈米氣泡之傳輸試驗如何進行與驗證？若僅以微生物菌落或污染物降解，似無法完整驗證奈米氣泡之影響。</p> <p>3. 添加之微生物菌種為何？是否為本技術之關鍵因素？</p>		<p>1. 在目前的量測方法中，可以選用顆粒追蹤法 (particle tracking analysis)、電阻法 (Electrical resistance method)、雷射散射光柵法 (Laser diffraction scattering method)、動態光柵法等 (Dynamic light scattering method) 方法進行超高溶氧奈米氣泡分析，本計畫於實驗室規模試驗中，將選用合適之方法進行量測，以確認奈米氣泡的傳輸情況，同時建立溶氧及氧化還原電位的關係。現場的地下水可能存在許多顆粒，因此本計畫應用之設備產生之奈米氣泡水，可取代水分子結構空隙中的氣體分子，將大幅提升溶氧，因此現地量測則以溶氧、氧化還原電位及氫氣濃度為指標。</p> <p>2. 先透過管柱及砂箱試驗，模擬奈米氣泡水灌注，量測奈米氣泡水的分布，量測溶氧、氧化還原電位等一般水質項目，以求得操作參數，模場試驗將透過監測井量測溶氧、氧化還原電位等一般水質項目，並觀察微生物菌相分布情形，以驗證其影響方式。</p> <p>3. 微生物添加為一輔助方法，當奈米氣泡水的供給仍無法對油品污染有良好的分解效果時，模場試驗將再額外添加微生物至場址中。在菌株的部分，本計畫擬添加研究團隊過去所分離出之油品分解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. NKNU01 作為主要的添加菌株，先於批次試驗與砂箱試驗中進行測試，確認奈米氣泡水對該菌株的影響，另外，研究中另將應用分子生物技術，確認奈米氣泡水對於批次試驗、砂箱試驗中，菌群結構與代謝特性的影響。</p>	



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

構想書審查意見回覆對照表

計畫年度	107 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 研究計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他		主持人：陳士賢 NO：29
計畫名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
本署審查意見		計畫單位回覆	
<p>1. 請說明本研究預計申請之專利項目及申請之方式為何?</p> <p>2. 請說明砂箱及管柱試驗是否能完整模擬實際場址之狀況?</p>		<p>1. 應用奈米高溶氧氣泡水加強現地好氧生物整治技術唯一新穎技術，經測試後，預期將可申請發明與新型專利，另外應用之工法如搭配流場控制與循環井之方法，則將以申請新型專利為目標進行申請。</p> <p>2. 將依據管柱及砂箱試驗設計了解奈米氣泡水於飽和層之滯留時間、影響範圍、溶氧濃度範圍等參數，管柱試驗將以石英砂建立近似現場水文地質條件的試驗，並以示蹤劑試驗進行流場確認，在灌注奈米氣泡水確認奈米氣泡水分散情況，盡可能取得可以應用於場址的參數，以應用於後續模場試驗。</p>	



專案基本資料表

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	專案類別(單選)	<input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗		
研究主題	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他				
申請機構系所	國立高雄師範大學生物科技系(所)				
機構地址	高雄市燕巢區深中路 62 號 生科 B 館生物科技系				
專案主持人	陳士賢	職等／職稱	教授		
協同主持人	鄭志鴻	職等／職稱	業興環境科技公司副總經理		
專案名稱	中文	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫			
	英文	Field Study of Enhanced Bioremediation by Injection of Water Saturated with Nano – scale Oxygen Bubbles			
	關鍵字	超高溶氧奈米氣泡水、現地生物復育技術、石化污染場址			
執行期程	自民國 107 年 01 月 10 日起至民國 108 年 11 月 30 日止				
專案主持人	姓名：陳士賢 E-mail：cschen@nknknu.edu.tw	專線：07-7172930#7312 手機：0935236622			
專任助理	姓名：黃琬瑜 E-mail：afatelu08010@gmail.com	專線：07-7172930#7312 手機：0963818558			
經費分析總表	專案預估總經費		第一年 申請金額	第二年 申請金額	編列說明
	1.	人事費用	492,032	433,637	(1-5 項相加之 50%為限)
	2.	貴重儀器使用含維護費	0	0	(與計畫實驗相關)
	3.	消耗性器材與主要費用	1,104,354	640,694	(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	6,960	10,078	(差旅與租賃費用)
	5.	雜項費用	5,745	6,500	(1-6 項相加之 5%為限)
	6.	行政管理費	160,909	109,091	(1-5 項相加之 10%為限)
專案計畫申請總金額			1,770,000	1,200,000	總金額：3,270,000

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，須於申請時向本署專簽說明，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：



(簽名及蓋章)

日期：1/7/2019



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

108 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：108 年 10 月 18 日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input type="checkbox"/> 研究專案 <input checked="" type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他		
申請機構系所	國立高雄師範大學	計畫主持人	陳士賢
專案名稱	以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。**(僅模場試驗類型專案需填寫工作進度達成數)**

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文						已投稿 JCTB 國際期刊。
		(2)研討會論文						
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1			1		
		(2)研討會論文						
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告						
		(2)研究報告						
	4.專著 (本數)							
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會						
		(2)成果發表會						
		(3)論壇						
B 人 才 培 育	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1			1		
		(2)技術平台						
	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2			2		
		(2)博士						
	8.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						
		(4)形成實驗室						



項目 \ 目標達成程度		申請 預估 數	工作進 度達成 數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)						



(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專 利、技術轉移相關詳細資 料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申 請 中	發明					
			新型/設計					
			合計					
B 研 發 技 術 移 轉	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)		1	1	1		
		(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	期末達成數	結案達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
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 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)						
	5.獲得獎項(件數)						
	6.提升能源效率(%)						
	7.節能減碳效率(%)						
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

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

我國現地好氧生物整治技術在土壤及地下水復育應用廣泛，但在技術上大多仍依賴營養鹽之注入及分解菌之植種，本研究擬開發一新穎現地好氧生物整治技術，透過高溶氧奈米氣泡配合抽、注井場及循環井之設置，提升地下水中的溶氧，刺激地下環境中的微生物在好氧的條件下分解油品類污染物，應用奈米氣泡顆粒小、持續時間較長的特性，利用水力控制使氣泡通過微小的土壤間隙，抵達細氣泡難以抵達的土壤間隙中，使微生物可獲得氧氣，另一方面，也突破目前氣提法(air sparging)中，曝氣影響半徑不足的問題。在本研究中將同時利用分子生物技術觀測場址過飽和溶氧誘導下，地下環境中的微生物菌群變化，與石油碳氫化合物分解酶的功能性基因特性，配合場址環境因子與營養條件的營造，建立現地操作條件，期望透過所發展之超高溶氧奈米氣泡水現地生物整治技術，結合循環井及強化性生物復育加快現有石化場址整治期程，發展本土化實際可行之整治技術，提升我國土壤及地下水污染整治技術水準。





中文摘要

本研究目的為開發一新穎現地好氧生物整治技術，應用奈米氣泡顆粒小、持續時間較長的特性，利用水力控制使氣泡通過微小的土壤間隙，使微生物可獲得氧氣，透過奈米氣泡配合抽、注井場，提升地下水中的溶氧，刺激地下環境中的微生物在好氧環境下分解石化污染物，另一方面也突破目前氣提法(air sparging)中曝氣影響半徑不足的問題，開發出一新穎之本土化的石化場址現地生物整治技術。

研究主要分為實驗室試驗以及污染場址模場試驗等二個部份，實驗室試驗區分為管柱與砂箱試驗等二個部份以收集操作參數，透過觀察奈米氣泡水的傳輸情況，了解高濃度溶氧停滯及消散之情形，同時建立系統操作參數基線資訊、監測技術與方法。模場試驗則是選取高雄市大社工業區中的某石化污染場址進行技術試驗，設計抽、注井場與循環井場，利用模場試驗方法，建立與發展超高濃度溶氧奈米泡水現地生物整治技術的操作參數與方法，開發一完整之新穎整治技術，提升我國土壤及地下水污染整治技術水平。

管柱實驗顯示飽和溶氧水垂直狀態下之溶氧較不易消散。以高濃度氣體溶解裝置循環製造高溶氧水，製程時間選擇為 30 分鐘，溶氧濃度大於 40.9 mg/L，而高溶氧水在開放與密閉系統中的溶氧量皆維持在一定濃度，長期觀察 20 天後溶氧無顯著差異。高溶氧水之水平管柱實驗顯示，注水後之 24 小時溶氧劇烈減少，從 27 mg/L 降至 10 mg/L，但此後溶氧減少即趨於和緩，在歷經 120 小時後高溶氧水仍能維持原溶氧之 80%以上。高溶氧水在垂直管柱中傳輸亦會造成溶氧損失，注入水經滯留時間 24 小時後溶氧劇烈減少，從 27 mg/L 降至 9 mg/L，但此後溶氧減少即趨於和緩，滯留時間 120 小時後所偵測的溶氧值 8.54 mg/L，仍是高於常溫飽和溶氧水。以長 60 公分、寬 51 公分、高 65 公分之砂箱進行傳輸試驗，砂箱每 15 公分處放入一支篩管，各篩管在第一天之溶氧降低最多，在 96 小時後，溶氧僅剩原始之 40%，第四天至第十六天其溶氧減少呈現趨緩，且從距離對應天數來看，不同距離之溶氧量消散速度不同。

本計畫之裝置、監測井及注水井於 2018 年 8 月建置完成並且完成試車，而於 2018 年 9 月 7 日進行土壤及地下水採樣並建立該模場之基線資料。模場區域土壤採樣點位編號分別為 S1、S2 及 S3，每個樣點採樣深度為 4 至 6 公尺，每 50 公分為一單位。土壤之酸鹼值約介於 6.54 至 7.72，平均為 7.40，氨氮約為 0.018—0.027%，平



均為 0.015%；磷約為 241—444 mg/kg，平均為 390 mg/kg。6 個樣本之菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標是介於 6.91—7.11 之間，其中以樣點 S2 深度 4—5 m 與 5—6 m 的土壤之菌相多樣性最高，樣點 S3 深度 4—5 m 的土壤最低。比較 3 個採樣點土壤中菌相差異，S2 樣點土壤中平均觀察菌種數與不同深度間差異高於 S1 與 S3 樣點，且 S2 樣點土壤中菌相多樣性亦高於 S1 與 S3 樣點。地下水採樣點位編號分別為 GW1、GW2、GW3、MW1 及 MW2，本場址之地下水水位為 2.07—2.33 米，而溫度、酸鹼值及溶氧均差異不大，應為同一區域之水源，故其數值較為相近，ORP 之檢測數據則為 -2.30—84.4 mV，EC 之測值則為 435 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。5 個樣本之菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標是介於 4.94 與 6.74 之間，其中以 GW3 的菌相多樣性最高，MW2 次之，MW1 最低。比較注入井與監測井菌相之差異，注入井平均觀察菌種數與組間差異高於監測井，且注入井菌相多樣性亦高於監測井。

模場試驗於 2018 年 10 月 8 日開始進行高溶氧水注入試驗，此階段分為三個月進行，第一個月每日注水 8 小時，灌注量為每日 2.4 m^3 ，第二個月開始每日注水 12 小時，灌注量為每日 3.6 m^3 ；2018 年 12 月 12 日開始進行每日注水時間為 24 小時不間斷注水，灌注量為每日 7.2 m^3 ；整體而言 MW2 在採用 8 hr/day、12 hr/day 間歇注入頻率中，溶氧上升幅度較小；而在連續 24 小時注入高溶氧水後，MW2 之溶氧有大幅度的提升，然而後續因考量 24 小時持續灌注高溶氧水可能會造成菌相稀釋效應，故於 2019 年 06 月 18 日開始調整每日注水時間為 12 小時。

本計畫建立環境指標，對比灌注一年期間前後的目標污染物檢測數據可得知，經過一年的注水後，苯的濃度從最初基線調查之 198—266 mg/L 降至 ND—15.1 mg/L，而在基線建立中超過地下水管制標準之乙苯，其濃度也從最高 5398 mg/L 降至 1.25—639 mg/L，而甲苯、苯乙烯在採樣中大多未檢出，雖然苯及乙苯仍超過地下水管制標準，但經過這一年的試驗，污染物濃度已大幅下降，在五個井位均呈現此趨勢，但乙苯及苯仍具高濃度，尤其乙苯仍是主要污染物，在地下水樣品中常有純相出現，至於污染物濃度大幅下降是灌注水稀釋或生物降解作用旺盛何者貢獻較多甚難判斷。

本計畫完成建立現場微生物指標，無論是任一口監測井所採集之地下水，其細菌物種數皆隨著持續加入高溶氧水後逐漸增加，特別是 MW1 監測井，其地下水中細菌物種數增加速度與數量皆高於 MW2 監測井，可能是 MW1 監測井較靠近於注入井 GW1 (相距 0.3 m) 而能獲得較多之氧氣所致。菌相分析顯示同時加入高溶氧水可能促進同一類型菌種大量生長，而使得兩口監測井地下水中菌相差異度減小。石化



污染物降解菌添加試驗，污染物濃度仍呈現下降，在五個井位均呈現此趨勢。在技術應用的可行性上，本研究立基於水力控制方法，因此只要水文地質環境適宜，便可以應用本研究所發展之技術。

目前奈米氣泡水於土壤及地下水污染整治之研究於國內外應用亟少，本計畫為一創新性之研究，期望可透過本研究之成果，擴大奈米氣泡水於我國土壤及地下水污染整治工作的應用。





英文摘要

Microbubble (MBs) and nanobubble (NBs) technologies have drawn great attention due to their frequent applications in water treatment, biomedical engineering, and nanomaterials in recent years. In particular, the focuses were on degradation of toxic compounds, water disinfection, and cleaning/defouling of solid surfaces including membrane from environmental aspects. The main purpose of water pretreatment is to reduce biological, chemical and physical loads in order to reduce the running costs and increase the treated water quality. In this context, air MBs/NBs as a pretreatment means has been shown to be highly beneficial for downsizing the water/wastewater treatment plants and improving the quality of product water. Use of oxygen NBs has been anticipated due to their extremely high bioactivity and mass transfer efficiency. It is reasonable to consider that NBs would have great potential implication in soil and groundwater remediation. Hence, the objective of this study is to develop the use of NBs in petroleum hydrocarbon contaminated site to facilitate and enhance bioremediation processes.

Laboratory experiments were conducted to investigate flow of discrete microbubbles through a water-saturated porous medium by column and sand box experiments in the first year study. NBs was release from a diffuser, move upward through a column filled with packed soil. Outflowing bubbles were collected for flux measurements. The scaling behaviors between the gas (bubble) release rates and various characteristic parameters of the bubble plume, including plume tip velocity, plume width, and breakthrough time of the plume front will be quantified. The experiments also revealed circulations of ambient pore water induced by the bubble flow. The results of column experiments indicated that loss of dissolved oxygen (DO) in air-saturated water was about 1 mg/L after 72 hours. After 120 hour of retention time in the packed column, DO loss in air-saturated water was about 1.90 mg/L. Vertical columns tended to retain oxygen for longer time than horizontal one.

Dissolved oxygen was measured to be 40.9 mg/L after nano-scale oxygen bubble was produced for 30 min. Longer exposure time did not significantly increase the level of DO. DO depletion was not observed in either open or closed system after 20 days when dissolved oxygen level in the water was raised by nano scale bubble. Dramatic depletion of DO from 27 mg/L to 10 mg/L was observed in the first 24 hours of the column experiment. After the time period, the depletion was slow down. After 120 hours, DO was maintained higher than saturated water of room temperature. Forty percent of DO depletion was observed



after 96 hours in the sand box experiment. However, the depletion was slower between 4 to 16 days.

Field study was conducted since August 2018. Test zone with injection and extraction wells were designed and employed in a petroleum hydrocarbon contaminated site in Kaohsiung. Injection of NBs was conducted in the test zone with three injection wells and two monitoring wells. Injection of high DO water was 8 hours per day in the first month. It was increased to 12 hours per day in the second months. Finally, continuous injection of 24 hours was performed. After the long term practice, injection of high DO water of 12 hours was recommended because the whole day injection of high DO water may potentially dilute the dissolved phase contaminants and dilute the populations of microorganisms in the subsurface environment.

Groundwater monitoring of pH, dissolved oxygen, nutrients and change of population/diversity of microorganisms was performed. Retention time of NBs, concentration of dissolved oxygen, and change of petroleum degrading bacteria species was observed monthly.

After the one year injection practice of high DO water, the apparent concentrations of target contaminants were declined. Benzene was reduced from 198 to 266 mg/L to not detectable to 15.1 mg/L. Though concentration of ethylbenzene in groundwater decreased from 5398 mg/L to 1.25-639 mg/L, it remained the major contaminant. The degradation mechanism is unclear due to potential impact of dilution of groundwater by injection or high rate of biodegradation.

It is anticipated that functions of enhanced bioremediation can be achieved through injection and circulation of NBs by field practices. The results of microorganism diversity indicated that bacteria species tended to increase with long term injection of high DO water. Petroleum-degrading bacteria (*Enterobacter tabaci*) was applied in the site for enhanced bioremediation. The concentrations of target contaminants were decreased. This study serves as a leading project for future investigations to employ nanobubbles in the field of soil and groundwater remediation.



目錄

第一章、研究背景與目的.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	4
第二章、原理與設計.....	5
2.1 奈米氣泡特性與產生技術.....	5
2.2 超高溶氧奈米氣泡水現地生物整治技術系統設計.....	7
2.3 模場試驗場址環境特性.....	9
2.3.1 場址現況與特性.....	9
2.3.2 污染物種類與濃度.....	11
2.3.3 地質條件.....	15
2.3.4 水文條件.....	20
2.4 技術可行性、新穎性及未來性.....	21
第三章、研究方法.....	23
3.1 研究架構.....	23
3.1.1 實驗室試驗.....	24
3.1.2 模場試驗.....	26
3.2 實驗設備.....	28
3.3 實驗方法.....	31
3.3.1 土壤基本性質分析.....	31
3.3.2 目標污染物.....	31
3.3.3 菌相分析方法.....	31
3.3.4 功能性降解酶分析方法.....	32
3.3.5 土壤及地下水採樣方法.....	34
3.4 實驗品保/品管.....	35
3.5 進度及預期完成之工作項目.....	36
第四章、結果與討論.....	39
4.1 奈米氣泡水之量測技術校正.....	39
4.2 飽和溶氧水之管柱試驗.....	41
4.2.1 飽和溶氧水之水平管柱溶氧變化.....	41



4.2.2 飽和溶氧水之垂直管柱溶氧變化.....	41
4.3 高溶氧水之管柱試驗.....	43
4.3.1 高溶氧水製程時間.....	43
4.3.2 高溶氧水之水平管柱溶氧變化.....	43
4.3.3 高溶氧水之垂直管柱溶氧變化.....	44
4.4 高溶氧水之砂箱傳輸試驗.....	45
4.5 高溶氧水在開放與密閉條件之溶氧變化.....	49
4.6 模場試驗之設備建置.....	50
4.7 污染場址之基線資料建立.....	53
4.7.1 土壤之基線資料分析.....	55
4.7.2 地下水之基線資料分析.....	57
4.7.3 污染場址之背景菌相分析.....	59
4.7.3.1 地下水樣本背景菌相分析結果.....	59
4.7.3.2 土壤樣本背景菌相分析結果.....	65
4.8 奈米氣泡水傳輸試驗.....	69
4.8.1 地下水水質參數監測結果.....	70
4.8.2 地下水採樣分析結果.....	73
4.8.3 土壤採樣分析結果.....	79
4.8.4 菌相分析結果.....	81
4.8.4.1 不同時間採集的監測井地下水之菌相分析.....	81
4.9 油品分解菌添加試驗.....	91
4.10 綜合討論.....	93
第五章、結論與建議.....	95
第六章、參考文獻.....	97



圖目錄

圖 1-1	現地生物整治法處理系統.....	3
圖 1-2	一般氣泡、微米氣泡與奈米氣泡於水體環境中變化特性.....	3
圖 2-1	微米氣泡與奈米氣泡生產方法示意.....	5
圖 2-2	奈米氣泡溶氧能力測試.....	6
圖 2-3	超高溶氧奈米氣泡水之現地生物整治技術系統設計.....	8
圖 2-4	場址之控制計畫執行範圍.....	10
圖 2-5	本場址苯污染土壤調查結果(2005 年).....	12
圖 2-6	本場址甲苯污染土壤調查結果(2005 年).....	12
圖 2-7	本場址乙苯污染土壤調查結果(2005 年).....	13
圖 2-8	本場址苯污染土壤調查結果(2010 年).....	13
圖 2-9	本場址甲苯污染土壤調查結果(2010 年).....	14
圖 2-10	本場址乙苯污染土壤調查結果(2010 年).....	14
圖 2-11	模場試驗模擬場址壤心剖面圖(A-A').....	16
圖 2-12	模場試驗模擬場址壤心剖面圖(B-B').....	17
圖 2-13	模場試驗模擬場址壤心剖面圖(C-C').....	18
圖 2-14	模場試驗模擬場址壤心剖面圖(D-D').....	19
圖 2-15	模場試驗模擬場址之地質條件.....	20
圖 3-1	實驗室與污染場址工作架構.....	23
圖 3-2	管柱實驗裝置圖.....	24
圖 3-3	砂箱試驗裝置圖.....	25
圖 3-4	模場試驗預定執行位置示意圖.....	26
圖 3-5	第一階段模場井場規劃.....	27
圖 3-6	本實驗使用之 Headspace 平衡頂空裝置.....	28
圖 3-7	高濃度氣體溶解裝置.....	29
圖 3-8	手提式溶氧測定器.....	30
圖 3-9	溶氧測量儀.....	30
圖 3-10	活塞幫浦.....	30
圖 3-11	玻璃管柱.....	30
圖 4-1	不同溶氧計測值之變化.....	39



圖 4-2	水平管柱與垂直管柱.....	40
圖 4-3	砂箱之篩管編號與位置示意圖.....	45
圖 4-4	砂箱各測點之溶氧濃度變化.....	48
圖 4-5	實驗模場位置.....	50
圖 4-6	模場試驗之設備建置.....	51
圖 4-7	注入井及監測井.....	51
圖 4-8	注入井及監測井之建置情形.....	52
圖 4-9	採樣點位及編號.....	53
圖 4-10	土壤樣品.....	54
圖 4-11	地下水樣品.....	54
圖 4-12	模場中設置之注入井、監測井與土壤採樣點之位置圖.....	59
圖 4-13	注入井(A)與監測井(B)的地下水中所觀察物種數之盒鬚圖.....	60
圖 4-14	注入井(A)與監測井(B)的地下水中菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標之盒鬚圖.....	60
圖 4-15	注入井地下水中菌種同異之文氏圖.....	62
圖 4-16	監測井地下水中菌種同異之文氏圖.....	62
圖 4-17	MW1 與 GW1 井地下水中菌種同異之文氏圖.....	63
圖 4-18	注入井(A)與監測井(B)地下水中菌種同異之文氏圖.....	63
圖 4-19	地下水樣本中所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度.....	64
圖 4-20	地下水樣本中所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度.....	64
圖 4-21	土壤中所觀察物種數之盒鬚圖.....	66
圖 4-22	土壤中菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標之盒鬚圖.....	66
圖 4-23	土壤中菌種同異之文氏圖.....	67
圖 4-24	土壤中所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度.....	67
圖 4-25	土壤中所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度.....	68
圖 4-26	地下水採樣.....	69
圖 4-27	現場監測地下水.....	69
圖 4-28	注水端及監測井溶氧濃度變化.....	71
圖 4-29	土壤採樣.....	79
圖 4-30	所採集之土壤樣本.....	79



圖 4-31 兩個監測井地下水中所觀察細菌物種數之盒鬚圖.....	82
圖 4-32 兩個監測井地下水中菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標之盒鬚圖.....	82
圖 4-33 3 月份採集 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖.....	84
圖 4-34 6 月份採集 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖.....	84
圖 4-35 7 月份採集 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖.....	85
圖 4-36 8 月份採集 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖.....	85
圖 4-37 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖.....	86
圖 4-38 UPGMA 聚類樹.....	86
圖 4-39 不同時間採取的監測井地下水中所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度.....	88
圖 4-40 不同時間採取的監測井地下水中所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度.....	88
圖 4-41 2 個監測井地下水中所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度.....	89
圖 4-42 2 個監測井地下水中所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度.....	89
圖 4-43 LEfSe 分析所獲得之不同監測井中地下水菌相豐度顯著差異物種.....	90
圖 4-44 菌種鑑定報告.....	91
圖 4-45 菌種培養流程.....	92
圖 4-46 監測井 MW1 之溶氧與菌相濃度關係圖.....	94
圖 4-47 監測井 MW2 之溶氧與菌相濃度關係圖.....	94



表目錄

表 1-1 我國石化污染場址整治技術使用統計.....	2
表 3-1 RT-PCR 實驗中相關降解基因之 primer 序列.....	33
表 3-2 RT-PCR 反應條件.....	34
表 3-3 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖).....	37
表 4-1 飽和溶氧水之玻璃管柱基礎資訊.....	40
表 4-2 水平管柱中飽和溶氧水之溶氧變化.....	41
表 4-3 飽和溶氧水之垂直管柱不同時段之溶氧變化.....	42
表 4-4 高溶氧水製程時間對應溶氧濃度.....	43
表 4-5 高溶氧水在水平管柱之溶氧變化.....	44
表 4-6 高溶氧水在垂直管柱之溶氧變化.....	44
表 4-7 砂箱系列篩管溶氧變化量.....	46
表 4-8 砂箱系列篩管溶氧變化量.....	47
表 4-9 高溶氧水在開放與密閉條件之不同天數溶氧變化.....	49
表 4-10 土壤之基線資料.....	56
表 4-11 土壤污染物濃度.....	56
表 4-12 地下水基線資料.....	58
表 4-13 地下水污染物濃度.....	58
表 4-14 地下水背景樣本中觀察到的細菌種類數與 Shannon-Wiener 多樣性指標.....	60
表 4-15 土壤背景樣本中觀察到的細菌種類數與 Shannon-Wiener 多樣性指標.....	65
表 4-16 注水端及監測井溶氧溶度監測數據.....	72
表 4-17 地下水採樣分析結果(11/08/2018)	73
表 4-18 地下水採樣分析結果(12/11/2018)	74
表 4-19 地下水採樣分析結果(02/19/2019)	75
表 4-20 地下水採樣分析結果(03/27/2019)	75
表 4-21 地下水採樣分析結果(04/25/2019)	75
表 4-22 地下水採樣分析結果(05/30/2019)	76
表 4-23 地下水採樣分析結果(06/27/2019)	77
表 4-24 地下水採樣分析結果(07/19/2019)	77
表 4-25 地下水採樣分析結果(08/22/2019)	77



表 4-26 地下水採樣分析結果(08/30/2019)	78
表 4-27 地下水採樣分析結果(09/26/2019).....	78
表 4-28 土壤之檢測結果.....	80
表 4-29 土壤污染物濃度.....	80
表 4-30 不同時間採集的監測井地下水中觀察到的細菌種類數與 Shannon-Wiener 多樣性指標.....	81
表 4-31 地下水污染物濃度比較.....	93



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫



第一章、研究背景與目的

1.1 研究背景

現地生物整治法或現地生物復育法(In-situ bioremediation)乃是透過促進地下環境(土壤及地下水中)之微生物之生長以強化生物分解作用，通常可以應用來有效處理有機污染物，為了加強生物分解作用，通常必須將環境中的微生物加以馴養，提供足量的電子接受者(如氧氣、硝酸鹽)、營養鹽類(如氮、磷等)以及能量來源(碳源)。一般而言，污染場址中存在碳源，也就是有機污染物，而電子接受者與營養鹽類就成為生物降解作用最重要的兩個限制性因子。

過去國內在面對層出不窮的石化污染物場址時，大多會選用物理性的方法(如土壤氣體抽除法或雙相抽除法搭配空氣注入法)、化學氧化法、或加強式好氧生物整治方法來進行整治工作，常選擇的整治工法如表 1-1 所示。依據 2014 年環保署統計資料，石化及油品污染整治技術除了離場處理外，圖 1-1 為常見之加強式好氧生物整治方法，其中微生物菌群的維持、營養鹽提供與氧氣供給，為加強式好氧生物整治成功與否的三項重要關鍵。

在有機污染物的生物分解中，具有分解能力的微生物菌群是否存在，是否發生作用，為現地生物整治的重要關鍵因子，隨著分子生物技術的發展，有越來越多的分子生物技術可以有效地偵測與分析環境中的微生物菌群，並且透過功能性基因的檢測，可以得知環境中的微生物是否具有降解標的污染物的能力。然而，在實際現地整治工程執行上，除了添加具有分解能力的菌群外，僅可透過環境的調控(如 pH、溶氧、氧化還原電位)與營養鹽的供給，來提供適合具有分解目標污染物能力之菌群生長的环境。

在營養鹽的提供上，可以利用水平井或豎井，將調配好之營養鹽散佈至不飽和層與飽和層中，並透過抽、注水的控制，使污染物得以均勻分散至地下環境中。由於有機污物的好氧生物降解過程，氧氣將作電子接受者而被大量消耗，使得地下環境在整治過程中，逐漸轉為厭氧環境，因此在石化污染現地生物整治中，氧氣的提供亦為影響現地生物整治工法成效的重要關鍵因子。

傳統上氧氣的供給方式包含現地曝氣法、投入釋氧物質及抽出曝氣法，整體而言，現地曝氣法因為氣泡上浮的因素，在地下環境中不易有水平向的傳輸；緩釋型的釋氧物質所產生的氧氣則受限於地下水傳輸而不易擴散；過氧化物則是反應過快，氧氣無法持續供給；抽出曝氣法過去大多採用曝氣盤等散氣設備供給氧氣，雖可在短時間內



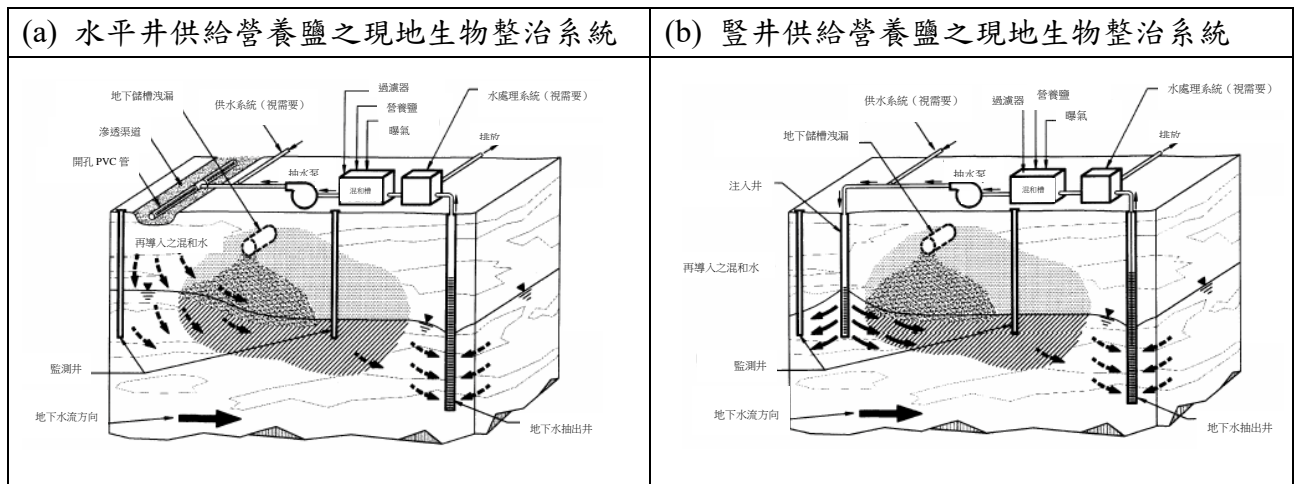
以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

達到飽和溶氧，但因為氣泡顆粒較大，溶氧不易維持，因此在抽、注循環的過程中需持續針對抽出水進行曝氣，以維持注入水中的溶氧。

表 1-1 我國石化污染場址整治技術使用統計

整治技術		使用場址		
土壤污染整治				
主要	搭配使用	數量	百分比	
開挖處理	排客土	94	54.3%	69.9%
	生物復育	18	10.4%	
	化學氧化	6	3.5%	
	土壤清洗	5	1.2%	
	熱脫附	5	1.2%	
	生物堆法	1	0.36%	
土壤氣體抽除法	-	38	22.0%	51.4%
	空氣注入法	43	24.9%	
	生物曝氣法	8	4.6%	
現地化學氧化法		48	27.7%	
雙相抽除法	-	27	15.6%	16.8%
	空氣注入法	2	1.2%	
加強好氧生物整治法		26	15.0%	
界面活性劑沖排法	-	4	2.3%	4.6%
	抽出處理法	2	1.2%	
	雙相抽除法	2	1.2%	
生物曝氣法		1	0.6%	
現地電熱法	雙相抽除法	1	0.6%	
地下水污染整治				
現地化學氧化法		60	52.2%	
空氣注入法	-	10	8.8%	49.1%
	土壤氣體抽除法	46	40.4%	
抽出處理法		39	34.2%	
雙相抽除法		29	25.4%	
加強好氧生物整治法		26	22.8%	
現地地下水生物整治		6	5.3%	
生物曝氣法	-	1	0.9%	5.3%
	土壤氣體抽除法	5	4.4%	
界面活性劑沖排法		5	4.4%	
現地電熱法	雙相抽除法	1	0.9%	

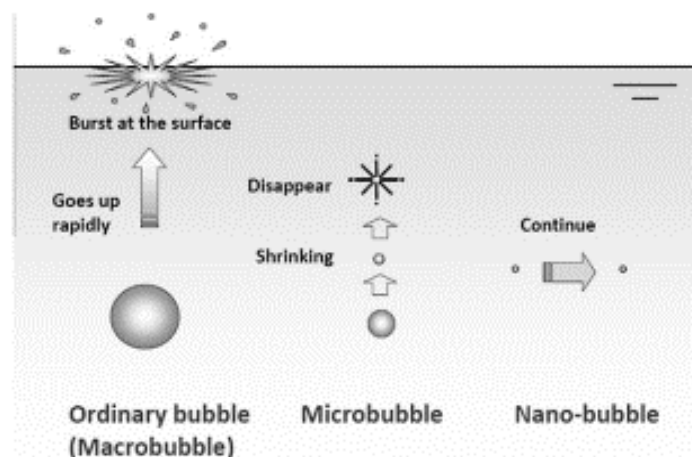
參考文獻：全國土壤及地下水污染整治策略旗艦領航計畫(行政院環保署，2014)



參考資料：“How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites - A guide for corrective action plan reviewers”, USEPA, EPA 510-R-04-002, May 2004.

圖 1-1 現地生物整治法處理系統

微米氣泡(Microbubbles, MBs)及奈米氣泡(Nanobubbles, NBs)為微小的氣泡，微米氣泡的直徑大小約為 $10-50\ \mu\text{m}$ ，而奈米氣泡則指是氣泡直徑 $<200\ \text{nm}$ 的氣泡。相較於一般的氣泡產生後，會在很短的時間內因浮力上升、壓力改變而破裂，微米氣泡通常會長時間存在水中，這個過程中微米氣泡的體積會逐漸縮小最後崩潰，此時存在於氣泡中的氣體會逐漸溶解於水中，而奈米氣泡因直徑更小則可以在環境中存在更久的時間，甚至數個月，一般氣泡、微米氣泡與奈米氣泡於水中變化的特性如圖 1-2 所示。



參考文獻：Degradation of methyl orange using short-wavelength UV irradiation with oxygen microbubbles. (Takahashi et al., 2007)

圖 1-2 一般氣泡、微米氣泡與奈米氣泡於水體環境中之變化特性



因為奈米氣泡及微米氣泡獨特的物理特性，當以氧氣作為氣泡產生源時，可以大量增加水中的溶氧，因此奈米氣泡及微米氣泡被大量應用於水產養殖、農產品耕作、水處理或河川治理等工作中，透過奈米或微米氣泡水供給的高濃度溶氧，提升水產及農產品產量，或提供足夠的溶氧使水中的污染物得以更順利地被進行好氧分解。此外微米氣泡在破裂過程中，可能會產生自由基而具有氧化能力，可進一步破壞水中的污染物，因此被應用於農產品的清洗。

1.2 研究目的

我國現地好氧生物整治技術應用廣泛，但在技術上大多仍遵循歐美先進國家所開發之技術與方法，本研究擬應用前述之奈米氣泡產生技術，開發新穎現地生物整治方法，利用奈米氣泡顆粒小、持久性高的特性，配合地下水抽注循環方式，改變現行現地生物整治的提供方法，強迫奈米級氣泡進入土壤間隙中傳輸，進而強化氣體於地下環境中的傳輸，使得氣體得以與污染物及微生物有更多的接觸，而擴大好氧生物整治作用，期能突破現地好氧生物整治技術溶氧供給與維持的技術瓶頸。

本研究將區分二個階段，第一階段利用實驗室砂箱試驗進行高溶氧水傳輸效率的測試，於此階段利用管柱試驗與砂箱試驗，模擬地下環境及不同土壤質地的組成與構造，建立操作條件，並確認技術可行性，同時尋找最佳的操作條件。第二階段則以大社工業區某一石化污染場址做為模場試驗場址，依據實驗室所建立的操作條件，建立模組化系統，以做為未來大規模實場應用的基礎，在本研究中將同時利用分子生物技術觀測場址中在過飽和溶氧誘導下，地下環境中的微生物菌群變化，與觀測石油碳氫化合物降解酶的功能性基因特性，配合場址環境因子與營養條件的營造，建立現地操作條件與套裝設備，發展本土化且實際可行之整治技術。



第二章、原理與設計

2.1 奈米氣泡特性與產生技術

微米氣泡或奈米氣泡的顆粒小、比表面積大，在污水處理的應用上，微米氣泡或奈米氣泡可應用於溶解空氣浮除法中，這些微小的氣泡可與水中的顆粒發生陷入(Entrapment)、成長(Growth)、碰撞(Collision)與黏著(Adhension)反應，再因為密度變小達到去除顆粒的效果(Edzwald, 1995)。而也因為氣泡顆粒小，因此亦有應用奈米氣泡水或微米氣泡水進行半導體製程中的表面顆粒清洗的應用(小林秀彰等，2014 年)。

微米氣泡或奈米氣泡的生成在實務上主要可區分為多孔性薄膜產生、壓力差生產法及渦流混合法等 3 種方式，如圖 2-1 所示，在本研究中，將應用國內某代理廠商所提供之小型奈米氣泡產生機(型號 OD-110，產量 2.1 t/hr)，依據原廠提供的資訊，該設備可以利用氧氣鋼瓶在短時間內產生超高濃度的溶氧，相較於傳統的曝氣設備或微米氣泡散氣設備，該設備的耗氧量較低，為一對環境較友善的技術(如圖 2-1(a))。

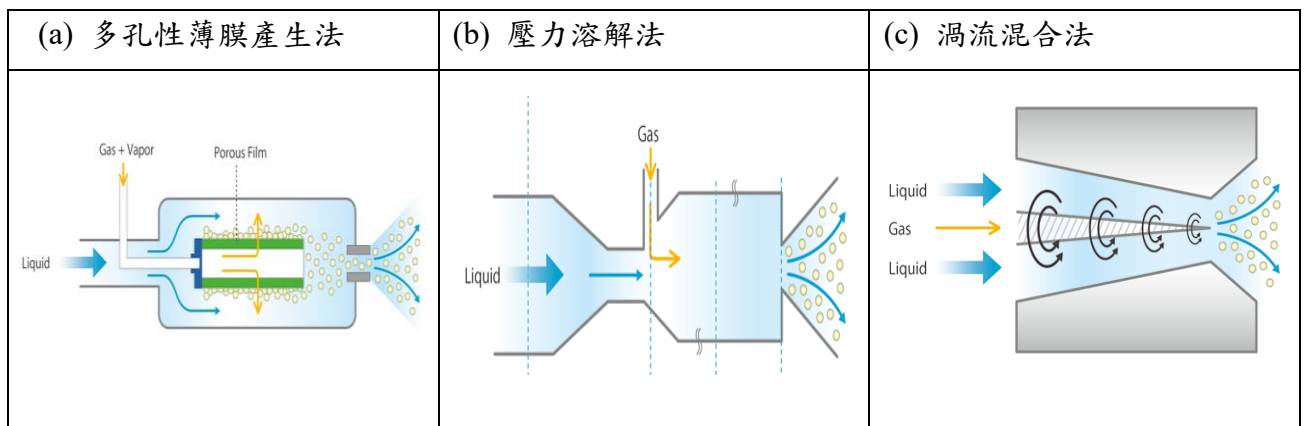


圖 2-1 微米氣泡與奈米氣泡生產方法示意圖



奈米氣泡因其顆粒較小，相較於傳統的曝氣方法，可提供環境較高的溶氧，且因其氣泡顆粒小，因此停留於水中滯留時間較長，使得溶氧得以長時間存在，因此奈米氣泡已被大量應用在水產養殖、農業生產，可有效增加漁產及農產收穫量，如與臭氧產生機結合，則可以提供持續性的氧化能力，達到除污的效果，因此亦被應用於農產品的清洗。由於奈米氣泡水可持續提供高溶氧的特性，目前已有許多先進國家將其用於河川污染整治領域，另外，也因為奈米氣泡顆粒小、比表面積大，因此國內亦有研究將之應用於溶解空氣浮除法中，強化污染物的分離效果。

依據製造商提供資料，比較傳統曝氣、氧氣曝氣及奈米氣泡曝氣(如圖 2-2(b)所示)，顯示奈米氣泡曝氣可提供較高溶氧等級，在本研究先導試驗的溶氧提升能力測試中顯示，經過 30 分鐘的曝氣與水循環，可將 250 L 自來水中的溶氧從 7.3 mg/L 提升至 20.0 mg/L，此外經過 5 天的靜置，曝氣後的自來水溶氧仍然可以維持 11.0 mg/L(如圖 2-2(b)所示)，顯示其產生之穩定性溶氧，因此本研究將應用該廠牌奈米氣泡產生機，做為本計畫實驗室及模場試驗之奈米氣泡產生設備。

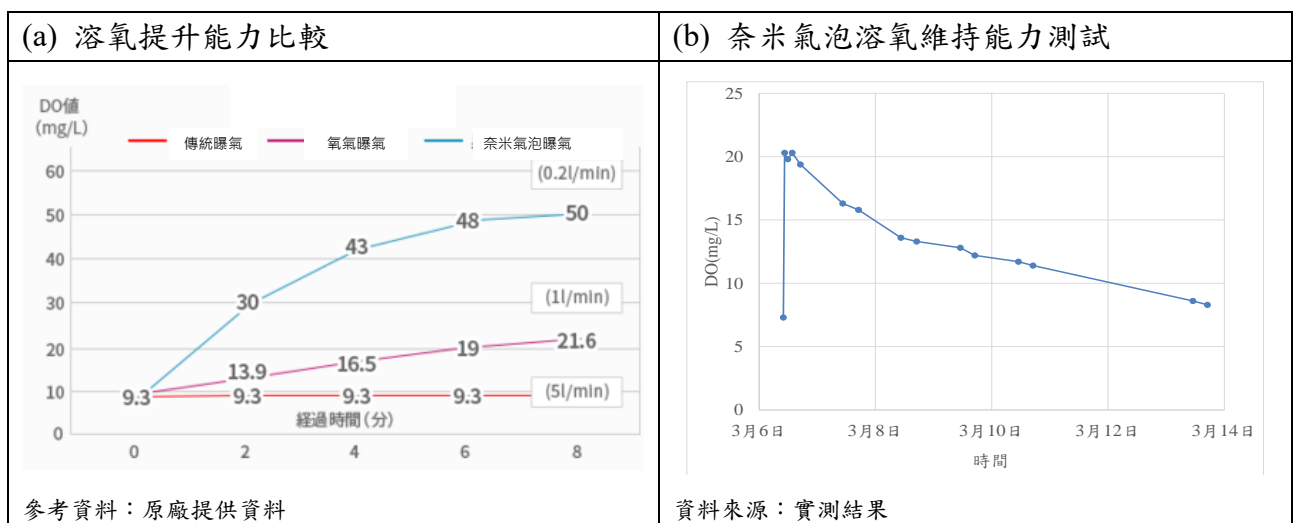


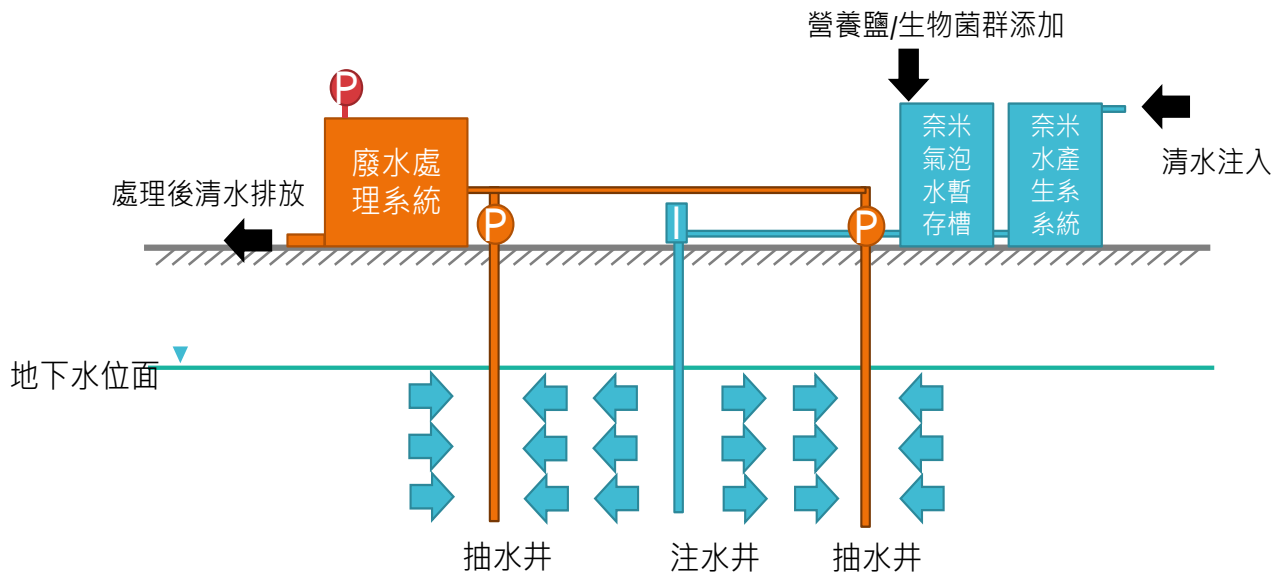
圖 2-2 奈米氣泡溶氧能力測試



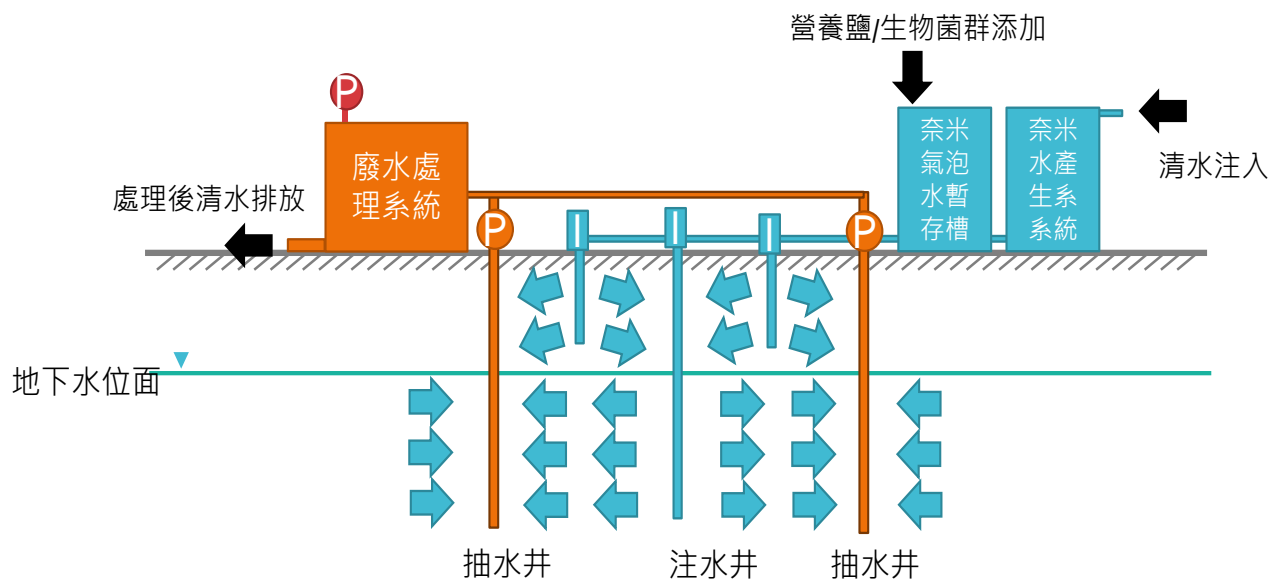
2.2 超高溶氧奈米氣泡水現地生物整治技術系統設計

由於微米或奈米氣泡相較於傳統的散氣盤或曝氣設備，能提供高濃度溶氧，且依據前述文獻與先導試驗內容可知奈米氣泡在環境中可以維持較長的時間，同時奈米氣泡的直徑落於 10—100 nm 間，一旦進入地下環境中，預期這些微小的氣泡顆粒將較容易通過土壤間隙而達到氧氣傳輸的效果。因此只要透過抽水與注水的控制，可使含超高溶氧的注入水傳輸至高污染區域，藉以提供足夠的氧氣做為好氧生物降解的電子接受者。

圖 2-3(a)為本研究預定發展之超高溶氧奈米氣泡水現地生物整治技術系統示意圖，未來將規劃以抽出之地下水或自來水做為水源生成奈米氣泡水，產生之奈米氣泡水再以注入井注入地下水中，注入井的開篩位置原則尚須涵蓋地下水位面，但可依據污染範圍、預定影響範圍調整，改以不同開篩區間進行注水。奈米氣泡水產生後，可依據水化學環境、土壤特性與微生物族群狀況，添加營養鹽、碳源或具有分解石油碳氫化合物的菌群。當污染物位於不飽和層時，則可參考圖 2-3(b)，以水平井或淺層豎井進行奈米氣泡水注入，提供水份、氧氣與營養鹽至不飽和含水層中，進行現地生物整治。當奈米氣泡水注入地下環境後，將利用抽水井進行低流量抽水控制，迫使奈米氣泡水於地下環境中移動，在抽注井場間，則設置監測井，可以溶氧為指標，監測奈米氣泡水的流佈情形。



(a) 超高溶氧奈米氣泡水飽和層生物整治技術示意圖



(b) 超高溶氧奈米氣泡水不飽和層生物整治技術示意圖

圖 2-3 超高溶氧奈米氣泡水之現地生物整治技術系統設計



2.3 模場試驗場址環境特性

本整治技術發展之目標，優先以加強石化類污染場址的生物降解為主，預計可強化生物整治的地下水目標污染物包含：汽、柴油造成之總石油碳氫化合物、甲基三丁基醚、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、取代基苯、萘等有機化合物，在場址環境特性部份，原則上以土壤質地為砂質或粉土質砂，且地下水補注良好、透水性佳之場址優先。依據徵求書中所列之要求，場址需為控制或整治場址，故本計畫篩選國內石化類污染場址，初步擬定以大社工業區一石化污染場址為主要試驗標的，以下針對本研究模場試驗所需之污染物種類、水文地質條進行說明。

2.3.1 場址現況與特性

本計畫選定位於高雄市大社工業區某石油化學公司(以下簡稱本場址)做為主要的試驗標的，該場址位於大社工業區中，用地類別為非都市工業區，其行業分類屬工業、營造業，所有權分類屬民營事業，從事乙苯、苯乙烯、ABS 塑膠、SAN 樹脂等石化原料製造、儲槽與販售工作。

以下簡單說明本場址主要進行何種製程與產品，苯乙烯(Styrene monomer, SM)為石化工業重要的中間原料，可用以生產 PS 塑膠、ABS 塑膠、苯乙烯 / 丁二烯橡膠(SBR)、不飽和聚酯(UPS)等。SM 製造方法係由苯(Benzene)和乙烯(Ethylene)兩種石化原料先經烷化反應形成乙苯(Ethylbenzene)，再經脫氫反應後形成苯乙烯產品，並有副產品甲苯(Toluene)及氫氣產生；而 ABS 塑膠製造方法係以丙烯(Acrylonitrile, AN)、丁二烯(Butadiene, BD)、SM 三種化合物經乳化、聚合及連續性聚合反應共聚而成的樹脂，全名為丙烯清-丁二烯-苯乙烯共聚物，簡稱為 ABS；SAN 塑膠(Styrene-Acrylonitrile resin)又稱 AS 聚脂，製造方法係以丙烯腈(Acrylonitrile, AN)與 SM 共聚而成的塑膠，具有良好的透明度、高抗張強度及硬度。由該廠相關製程推測導致污染發生之來源可能為苯乙烯製程中使用之原物料與產生之中間或最終產品，其廢油水分離與貯存設備管線破損滲漏於地表下，造成地下水污染。

本場址目前有兩處區域公告為土壤地下水控制場址，以苯、甲苯、乙苯為主要污染物質；場址淺層屬粉土質地質，深層則為砂質地層，地下水流向依枯豐水季由東向西轉為東南向西北流動。本場址自 2002 年起進行污染調查工作，迄今已進行 15 年之污染改善工作，2015 年提出「土壤及地下水污染控制變更計畫」，展延計畫執行期程 2018 年 6 月。本次控制計畫變更核定高濃度熱區採界面活性劑沖排，中低濃度區域採

空氣注入搭配土壤氣體抽除，並於局部死角區域以化學氧化強化處理，並接續採生物復育方式處理；污染團下游邊界區域以釋氧劑建置隔離帶，避免污染擴散，本場址目前控制計畫執行範圍如圖 2-4 所示。

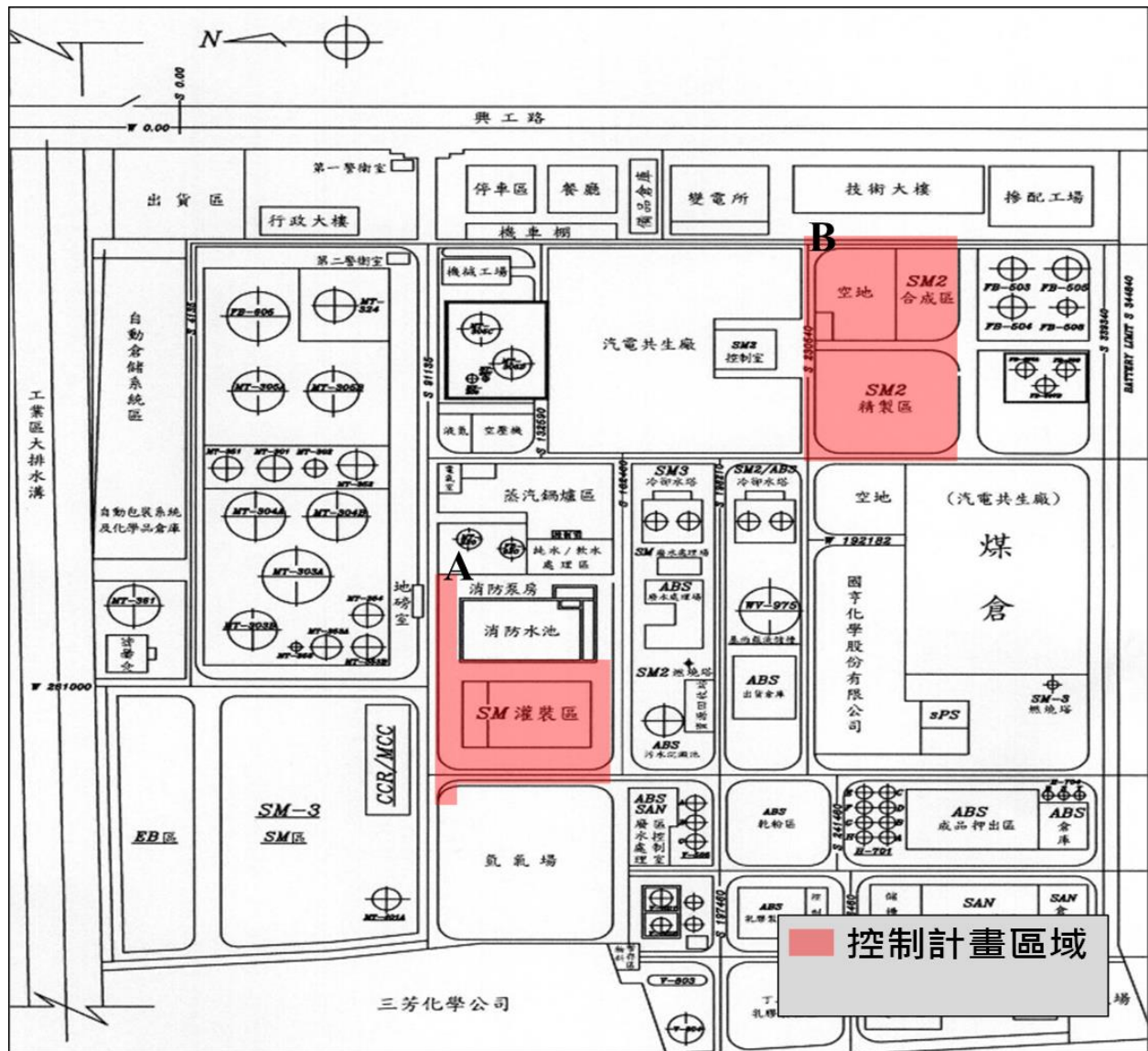


圖 2-4 場址之控制計畫執行範圍



2.3.2 污染物種類與濃度

模場試驗之場址以石化污染物為主，地下水曾檢出苯濃度(0.777 mg/L)，超過地下水污染管制標準，預估受污染含水層面積達 5,988 m²，受污染含水層厚度約為 3 m，土壤中曾檢出苯最高濃度 14.3 mg/kg 及乙苯濃度 4,320 mg/kg，超過土壤污染管制標準，預估污染土壤面積 5,988 m²，污染深度達 5 m (bgs)。

本場址之實驗區塊為位於圖 2-4 中之標號 A 區塊，此區塊於 2005 年調查結果發現有苯、甲苯及乙苯存在，如圖 2-5、2-6 及 2-7。而於 2010 年亦將此區塊進行污染調查發現僅剩於乙苯之污染較為明顯，如圖 2-8、2-9 及 2-10。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

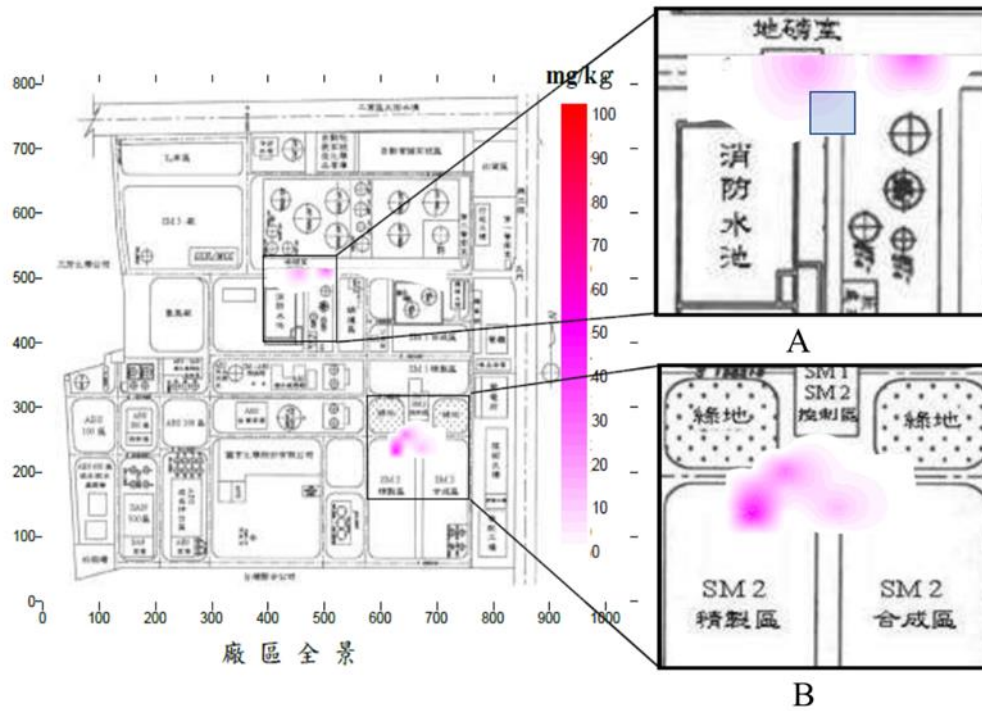


圖 2-5 本場址苯污染土壤調查結果(2005 年)

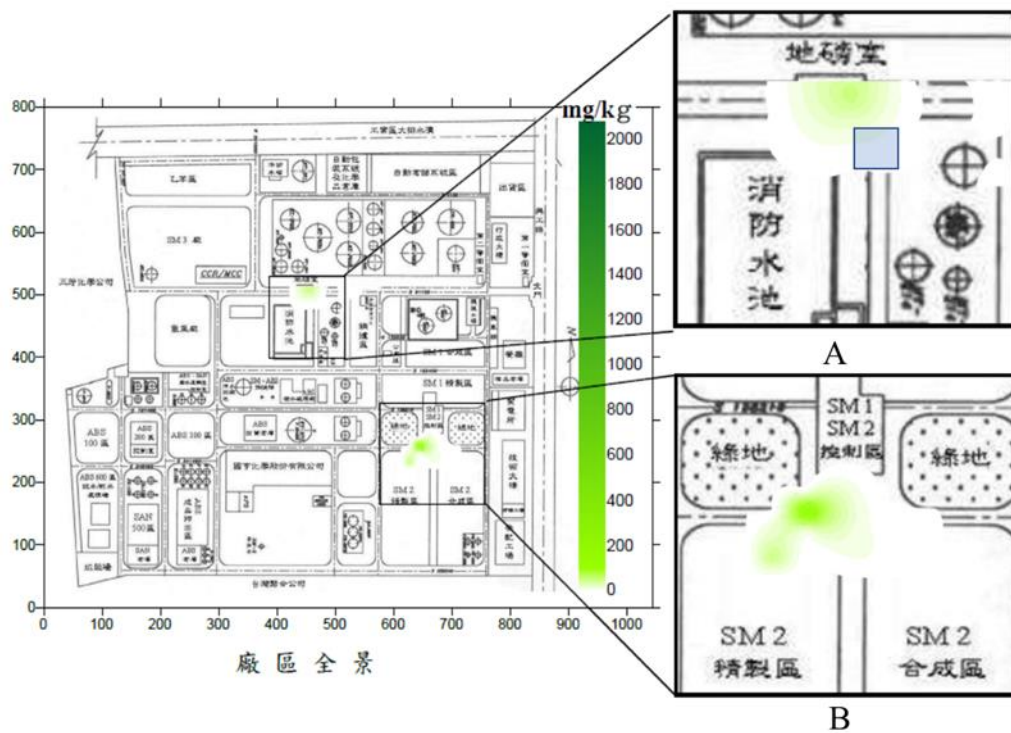


圖 2-6 本場址甲苯污染土壤調查結果(2005 年)

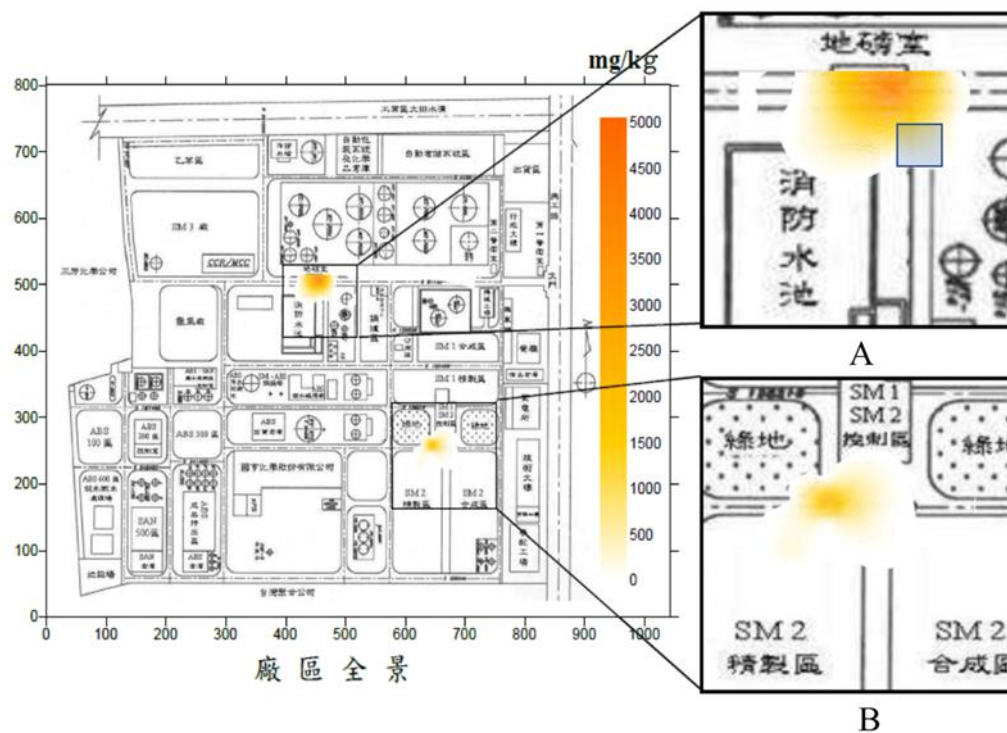


圖 2-7 本場址乙苯污染土壤調查結果(2005 年)

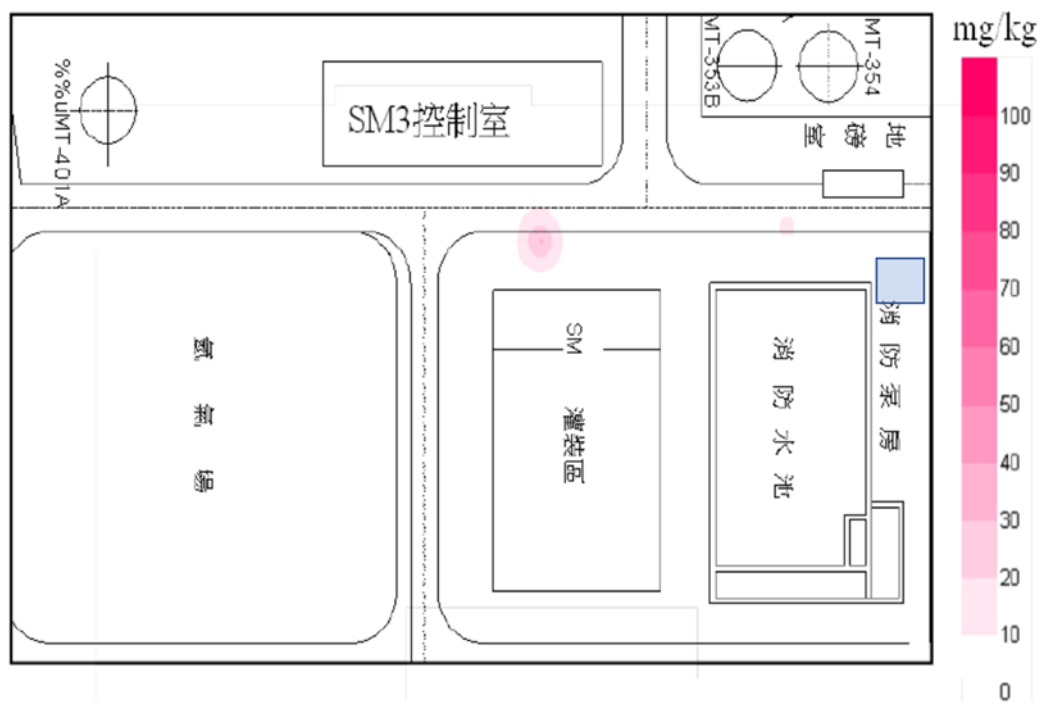


圖 2-8 本場址苯污染土壤調查結果(2010 年)

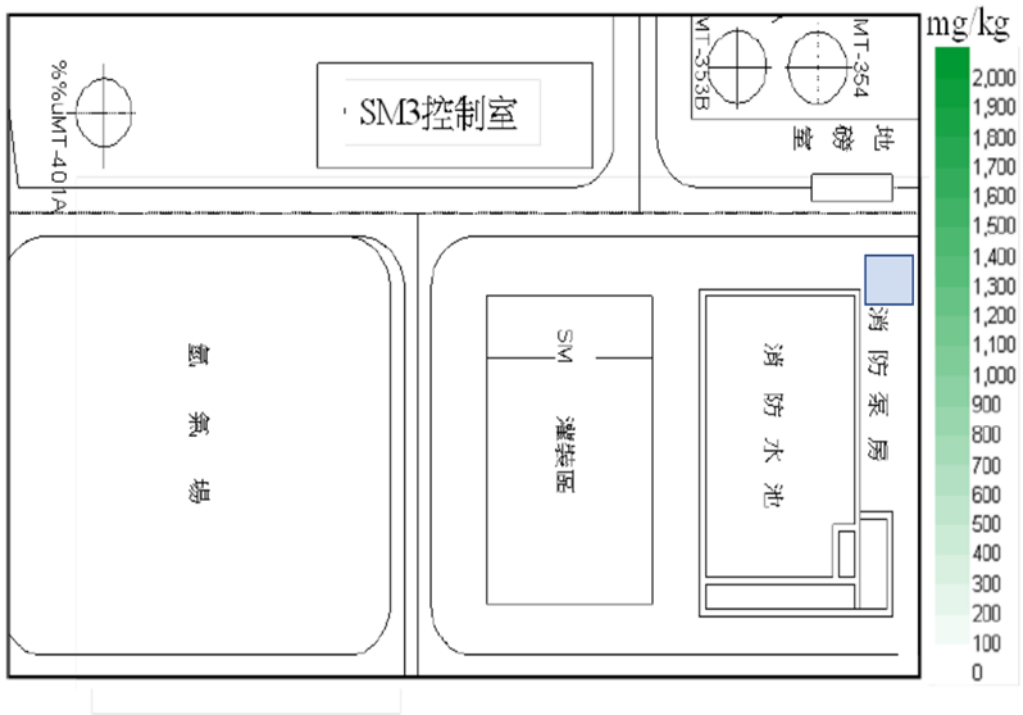


圖 2-9 本場址甲苯污染土壤調查結果(2010 年)

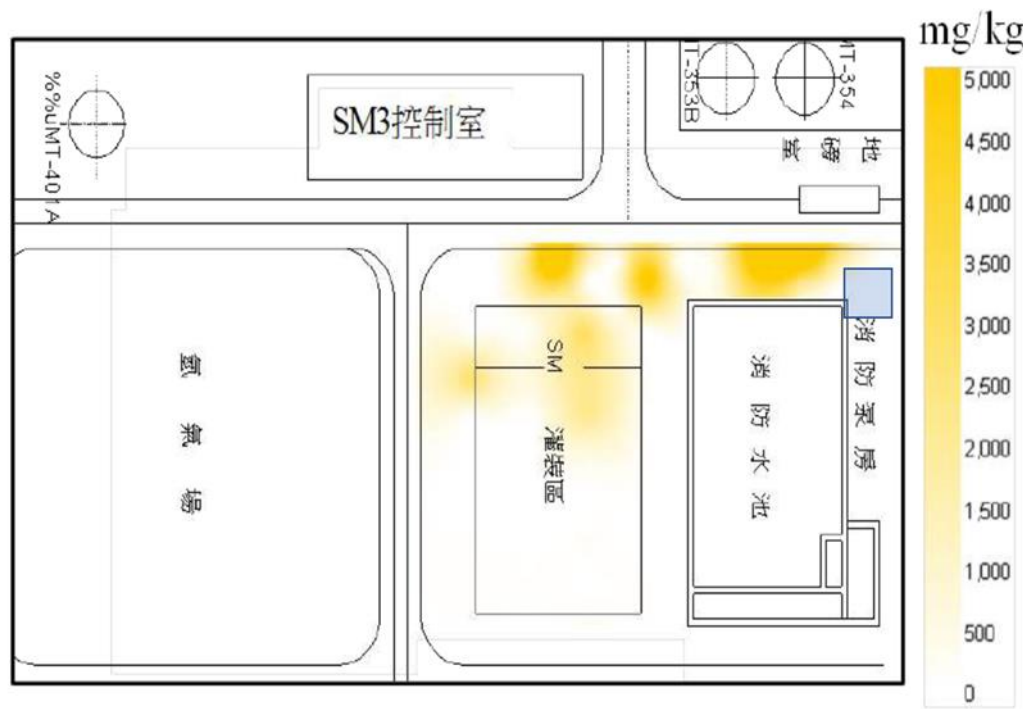


圖 2-10 本場址乙苯污染土壤調查結果(2010 年)



2.3.3 地質條件

場址位於高雄市大社工業區，該公司高雄廠之區域性地質結構於地表下 40~50 公尺以上主要為現代(第四紀)沖積層(Recent Alluvium)，係由礫石、砂、砂及黏土沉積物所組成。由於沉積物之來源、沉積環境與時間上的差異，使得沖積層的厚度與水文地質參數之分布亦因地而異。此外依據內政部建築技術規則，本場址位處高雄市大社區境內係屬弱震區，且場址附近並無活動斷層經過，故較無受地震影響之虞。

根據場址調查報告，藉由土壤鑽探連續取樣，分析含水層特性所得之土質，研判廠區內之土壤主要為砂質黏土、砂質細砂間隔組成，於地表下 0~2.5 及 11.5~15 m 處夾有高塑性有機黏土薄層。繪製四個切面之壤心剖面圖來加以分析，包括有 AA'、BB'、CC'及 DD'等四個壤心剖面，繪製結果如圖 2-11 至 2-14 所示。從地表以下 1~2 m 為道路鋪面與回填材料等；接著其下為黏質砂土、砂質黏土及砂質細砂等不均夾層，直至約地下 3~4 m 處。從地下 3~4 m 開始則普遍為細砂夾中砂層，其透水性良好；依據以往資料報告指出，廠內之地下水位亦多在此間變化。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

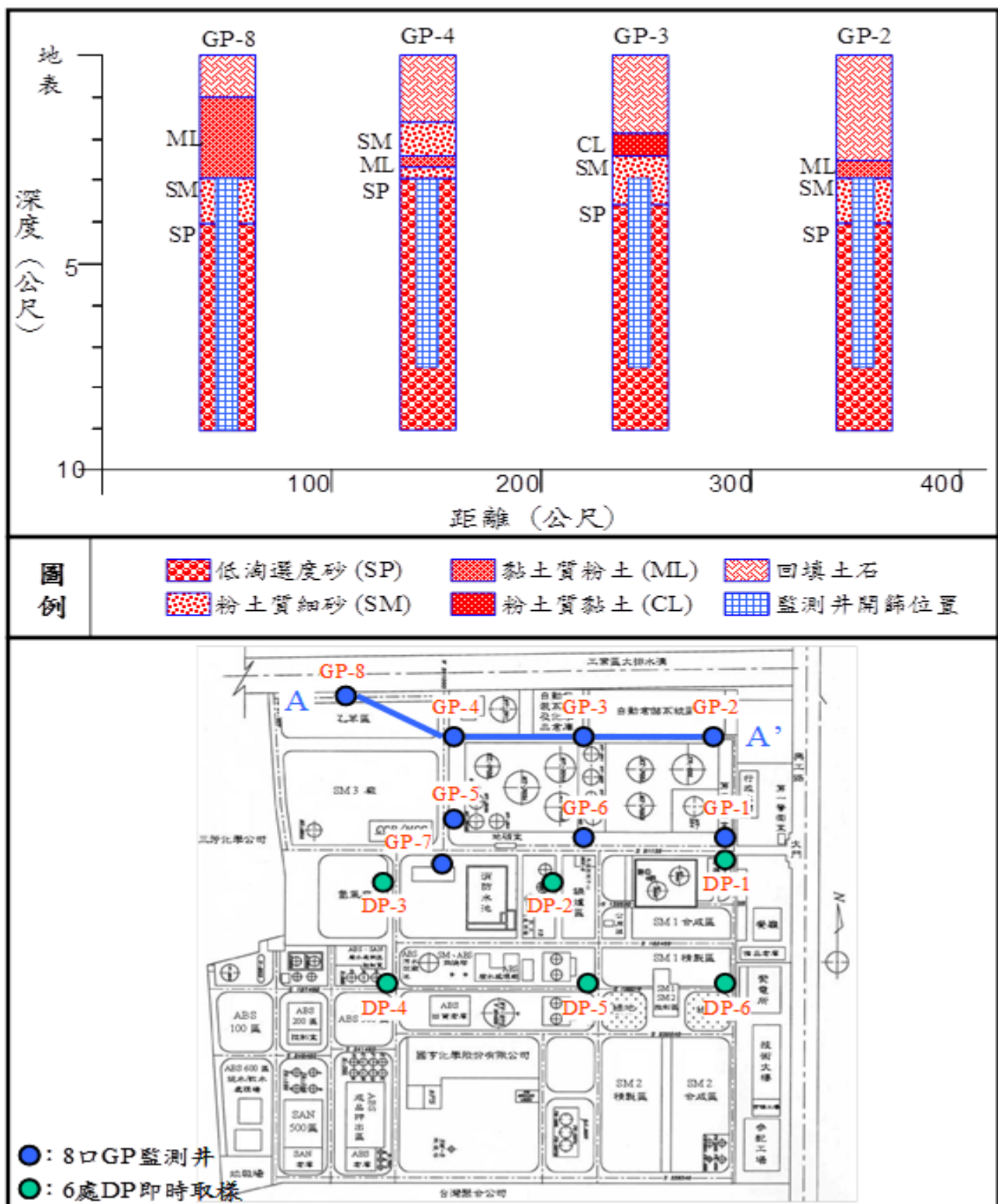
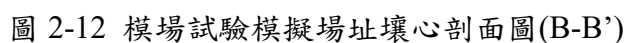


圖 2-11 模場試驗模擬場址壤心剖面圖(A-A')





以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

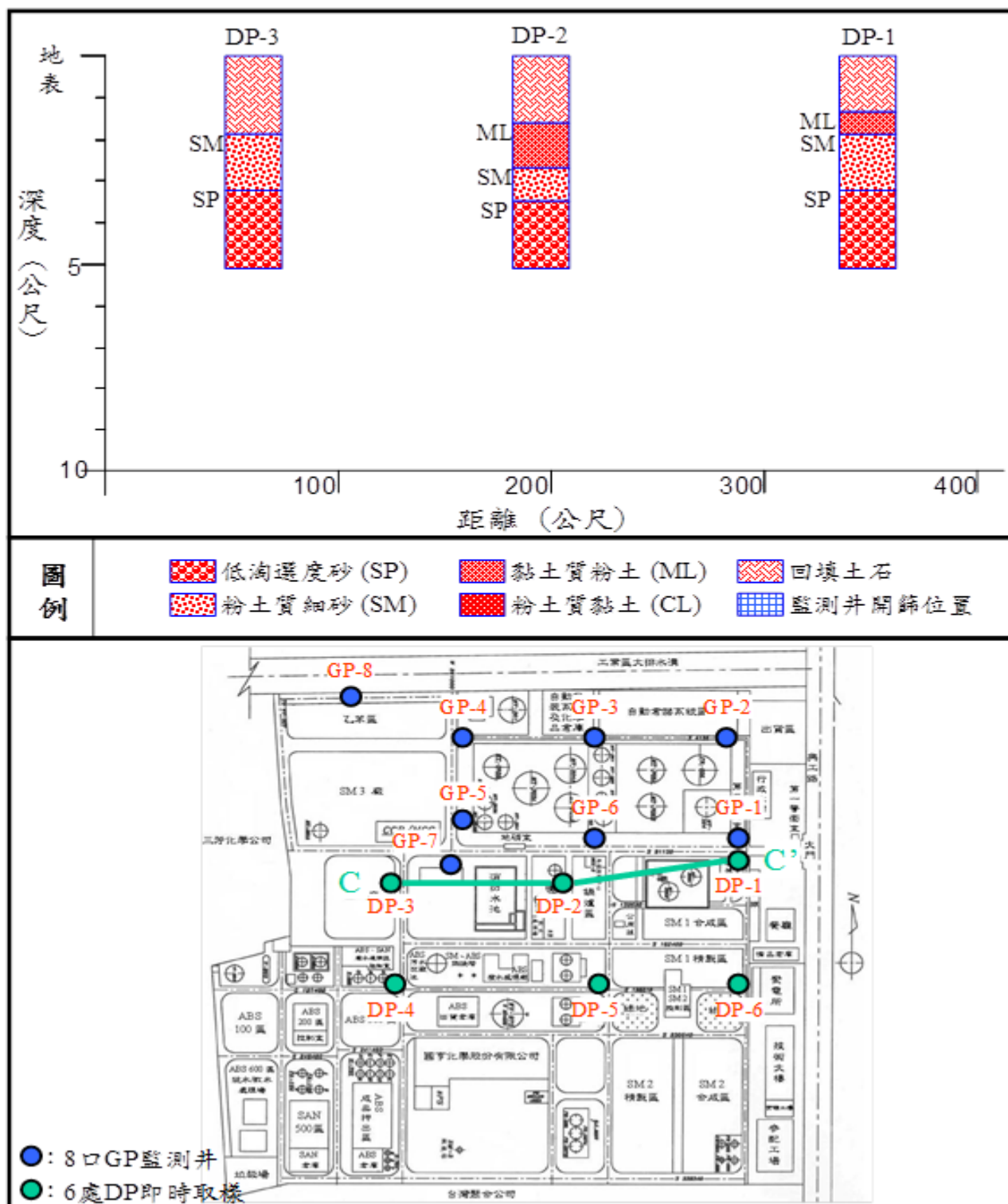


圖 2-13 模場試驗模擬場址壤心剖面圖(C-C')

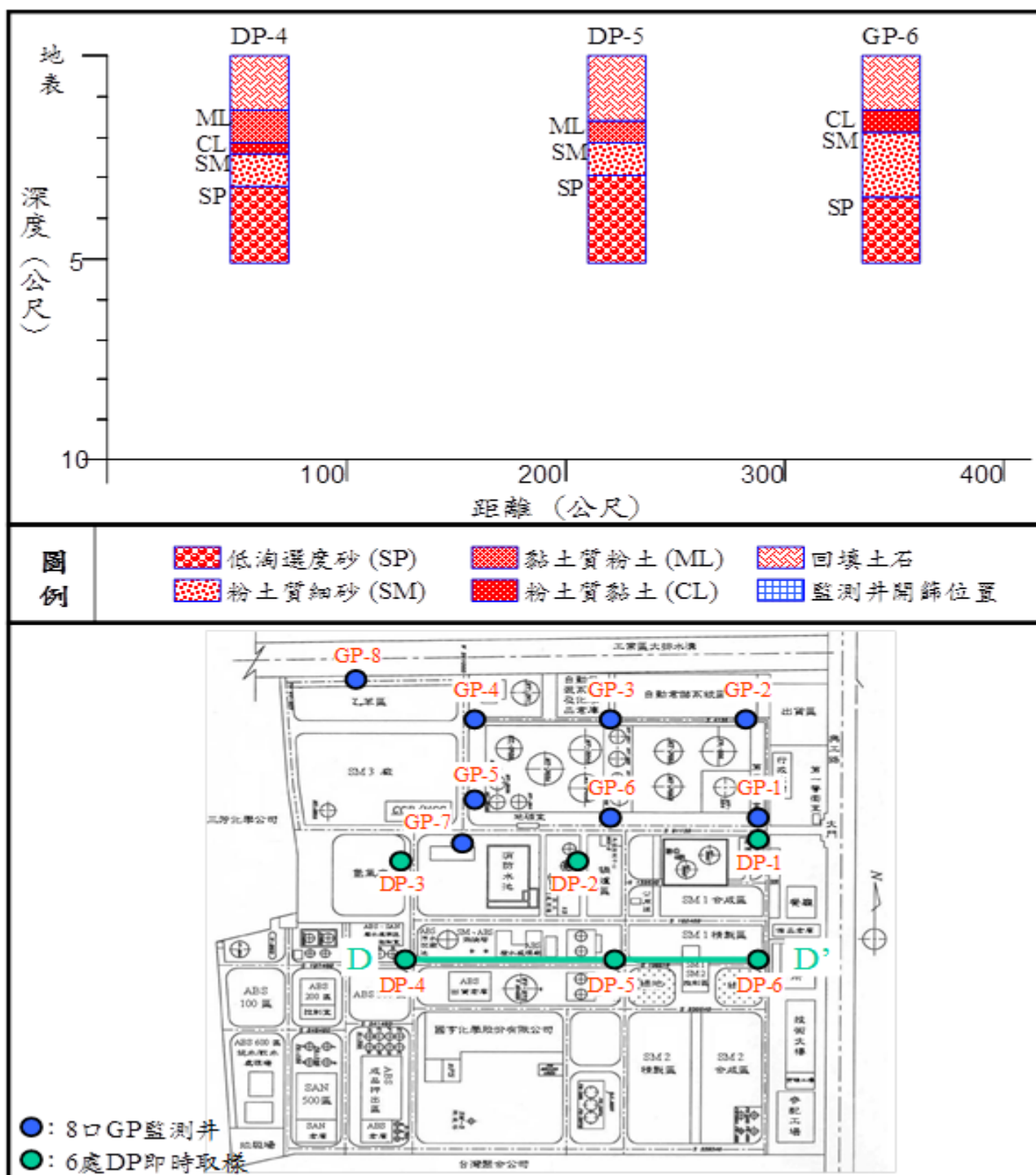


圖 2-14 模場試驗模擬場址壤心剖面圖(D-D')



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

2.3.4 水文條件

本場址位於大社工業區內，流經廠區北側之大排水溝，為楠梓溪之上游，依水利局之河川分類屬區域排水。楠梓溪發源於廠區東南方約 2 公里處之大社區與仁武區交界處，流經大社工業區後，穿越高速公路，向西北方進入高雄市楠梓區，於錦屏里附近匯流入後勁溪。地面水體平均水位坡降極為平緩，約在 1：780 左右。由場址第一區及第二區的地質柱狀圖抽水試驗的結果顯示，本場址通水係數介於 $0.0014 \text{ m}^2/\text{s}$ 至 $0.0092 \text{ m}^2/\text{s}$ 之間。由場址地下水水位之定期觀測資料顯示(圖 2-15)，枯水期地下水位高程約介於 10.35—0.92 公尺，地下水流向係由東向西；豐水期時則地下水位高程上升，約介於 10.56—11.31 公尺，場址地下水呈現向大社工業區大排方向流動的趨勢。

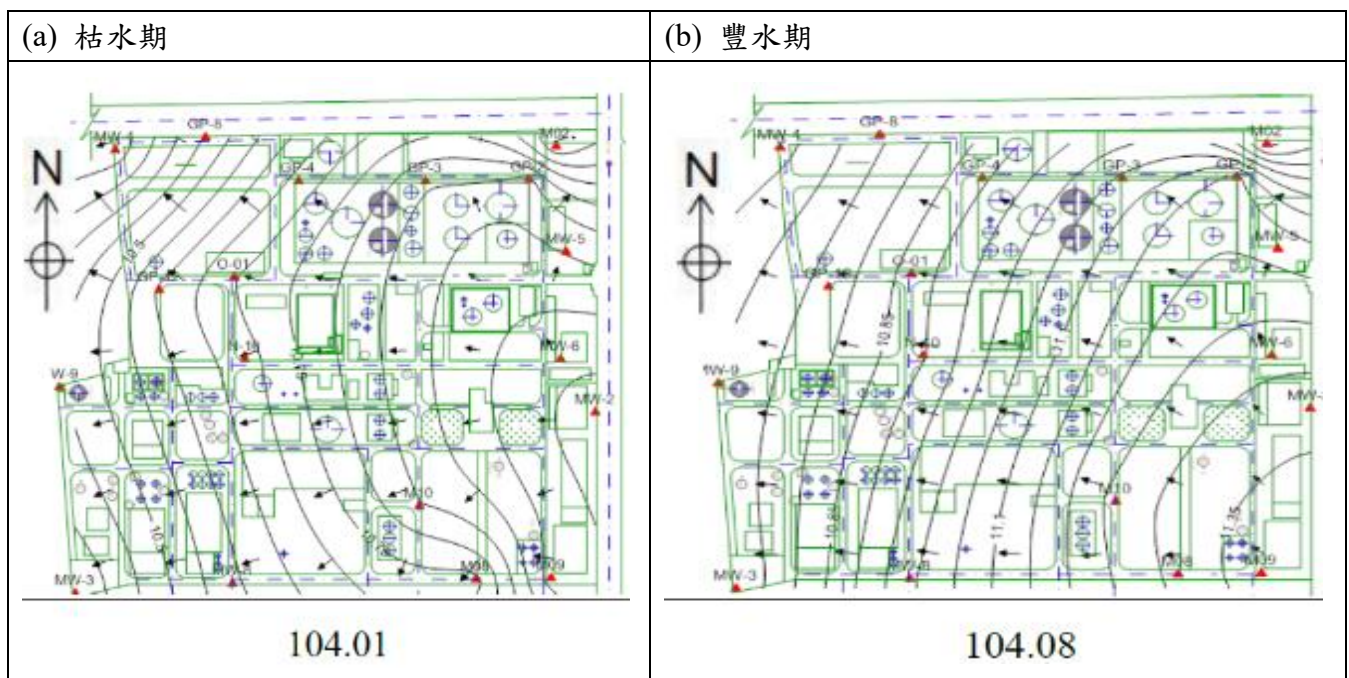


圖 2-15 模場試驗模擬場址之地質條件



2.4 技術可行性、新穎性及未來性

基於過去對於石化污染現地生物整治技術之研究成果，擬應用奈米氣泡產生設備作為一新穎的氧氣供給方式，並利用奈米級氣泡顆粒小、持久性高的特性，讓產生之氧氣得以透過水力控制的方式通過微小的土壤孔隙，相較於傳統利用現地曝氣井方式，氣泡無法有效進行水平傳輸，故本研究之方法將可突破傳統曝氣法氣體無法達到有效傳輸的限制。在技術應用的可行性上，本研究立基於水力控制方法，因此只要水文地質環境適宜，便可以應用本研究所發展之技術。本研究所發展之技術預期在未來可有更多之技術發展方向：(1)配合循環井或抽注井場，可做為未來被動式整治之工法，對於未來工業區或運作中場址之周界污染控制將產生極大貢獻。(2)奈米氣泡之產生設備如與臭氧產生機結合，預期可提升臭氧於水中的濃度與持久性，而突破傳統臭氧現地化學氧化方法的限制。(3)本計畫所採用之奈米氣泡產生技術乃是利用物理方法取代水分子團間隙的氮氣，而產生極小的奈米氣泡，因此一方面可加速揮發性有機物的揮發，另一方面可能可進一步應用超音波特性，利用能量強氧化或破壞水中的污染物。

目前奈米氣泡水於土壤及地下水污染整治之研究於國內外應用極少，本計畫為一創新性之研究，期望可透過本研究之成果，開啟奈米氣泡水於我國土壤及地下水污染整治工作的應用，預期可提升我國土壤及地下水污染整治技術水平。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫



第三章、研究方法

3.1 研究架構

本計畫擬進行二階段之技術開發工作，以技術開發與操作條件建立為前提，規劃整體研究內容。本研究主要區分為實驗室研究及模場試驗兩個部份，執行 2 年之技術試驗計畫工作，實驗規劃如圖 3-1 所示，分述如下：

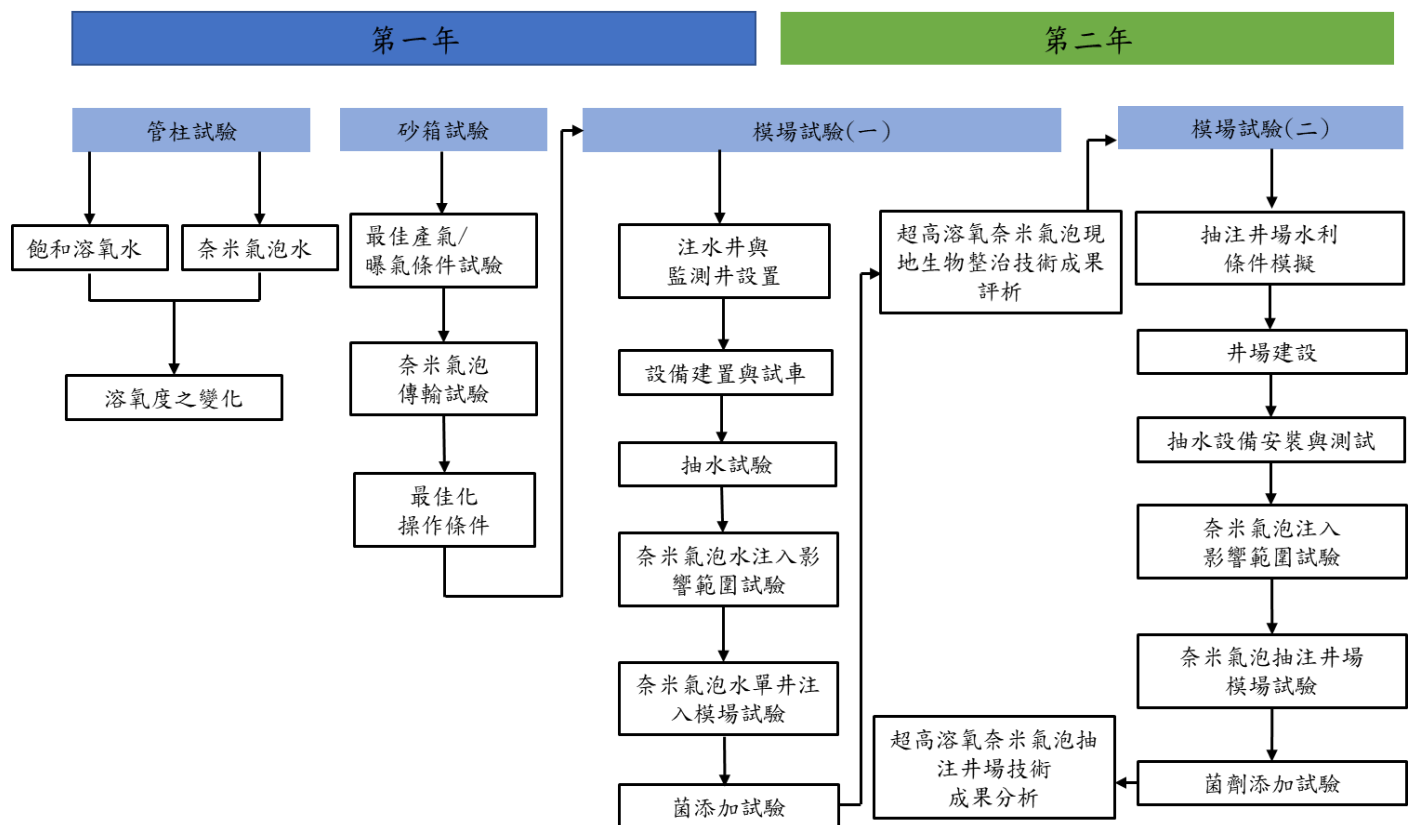


圖 3-1 實驗室與污染場址工作架構



3.1.1 實驗室試驗

實驗室試驗的第一階段為進行玻璃管柱試驗，以填充土壤的玻璃管柱模擬飽和溶氧地下水於地下環境中伴隨時間之溶氧變化量，故以內徑 4.8 cm、長度 15 cm 之玻璃管柱緊實填充供試土壤，模擬未受污染的地下環境(如圖 3-2)。兩側蓋上附有鐵氟龍濾網之塞蓋後稱重紀錄，一端接上幫浦(piston pump)以流速為 0.576 mL/min 之 0.01 N 氯化鈣(CaCl_2)溶液沖洗填充供試土壤 4 小時，使管柱成為飽和狀態，藉以模擬土壤之飽和層(saturated zone)。靜置 24 小時後稱重，二次稱重之重量差即為管柱中孔隙體積，再取飽和溶氧水模擬地下水注入管柱，分別觀察在水平管柱與垂直管柱中飽和溶氧地下水在不同時間條件下(24hr、48hr、72 hr、96 hr 及 120 hr)之溶氧變化量。

實驗設計以定量 pump 將飽和溶氧水持續注入管柱，並持續收集 20 mL、40 mL、60 mL 及 80 mL 流出液，並檢測及記錄其溶氧，如圖 3-2 所示，繼續使用 pump 將飽和溶氧水注入管柱一段時間，以確保管柱中之飽和溶氧水為新注入，並且無前次試驗之殘留地下水，靜置一段時間，以作為觀察地下水不同滯留時間下其溶氧變化。

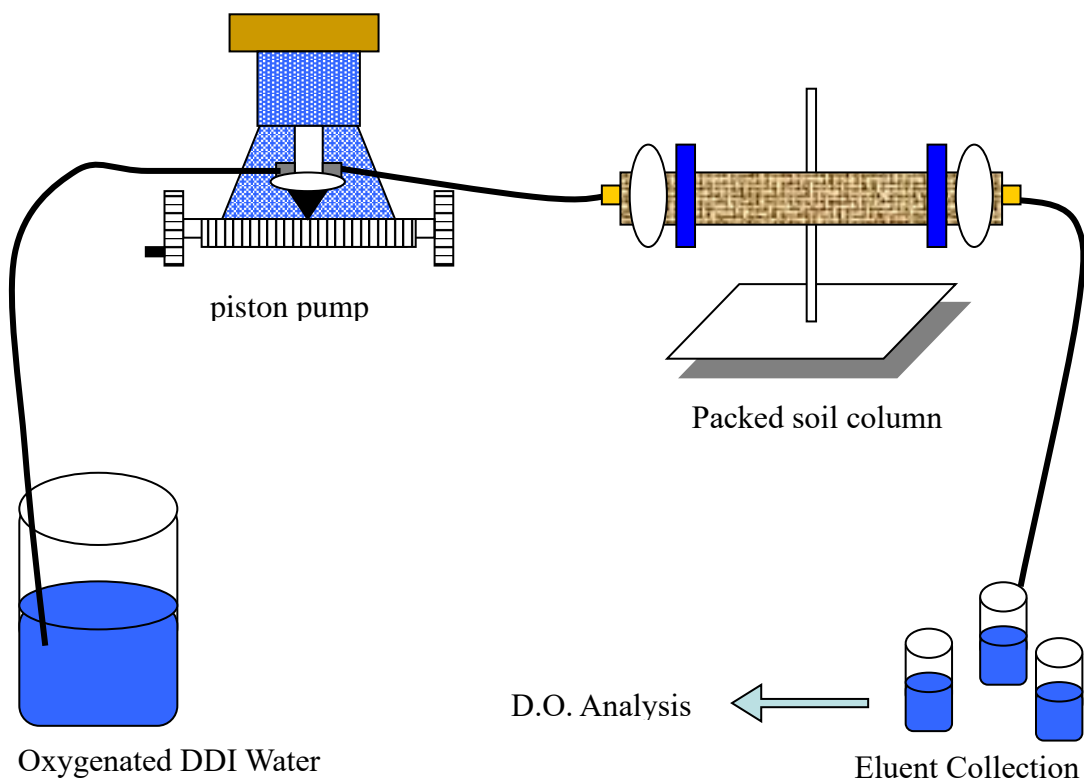


圖 3-2 管柱實驗裝置圖



實驗室規模試驗的第二階段，則是依據設計奈米氣泡水產生與灌注條件，透過砂箱試驗設計，了解超高溶氧奈米氣泡在地下水中於土壤孔隙介質之傳輸情形，如圖 3-2 所示，特別是觀察地下水流速快慢對奈米氣泡之維持及影響，透過不同測點(模擬地下水監測井)，了解奈米氣泡在土壤孔隙介質之滯留時間及溶氧對應時間序列之變化情形，以做為模場試驗超高溶氧奈米氣泡曝氣頻率、注入量及模場試驗之參考。砂箱試驗主要監測項目為水位、DO 等水質項目，並確認奈米氣泡水於土壤孔隙介質之傳輸及溶氧消散情況。



圖 3-3 砂箱試驗裝置圖



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

3.1.2 模場試驗

(1) 研究目的

模場試驗係建立超高溶氧奈米氣泡現地生物整治技術井場配置之最佳化條件，依據實驗室試驗所建立之曝氣條件，於現場進行測試，觀察奈米氣泡於地下環境的傳輸狀況，同時確認場址環境中污染物濃度的變化，並進行質量平衡計算及微生物族群變化、石油碳氫化合物功能性降解酶之變化，以確認生物整治之成效。

(2) 模場試驗所在位置

為確保本計畫執行之模場研究不致影響場址現階段污染改善工作，與場址所有人磋商後，選定場址第一區東北側污染區域周界附近 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 之範圍進行試驗，並且選擇該區域 SVE/AS 影響半徑之外之區域設置本計畫執行之井場，以避免計畫執行期間相互干擾，同時亦可比較場址 SVE/AS 及後續生物整治之效果，本計畫模場試驗預定執行之區域如圖 3-4 所示藍色方形區塊。

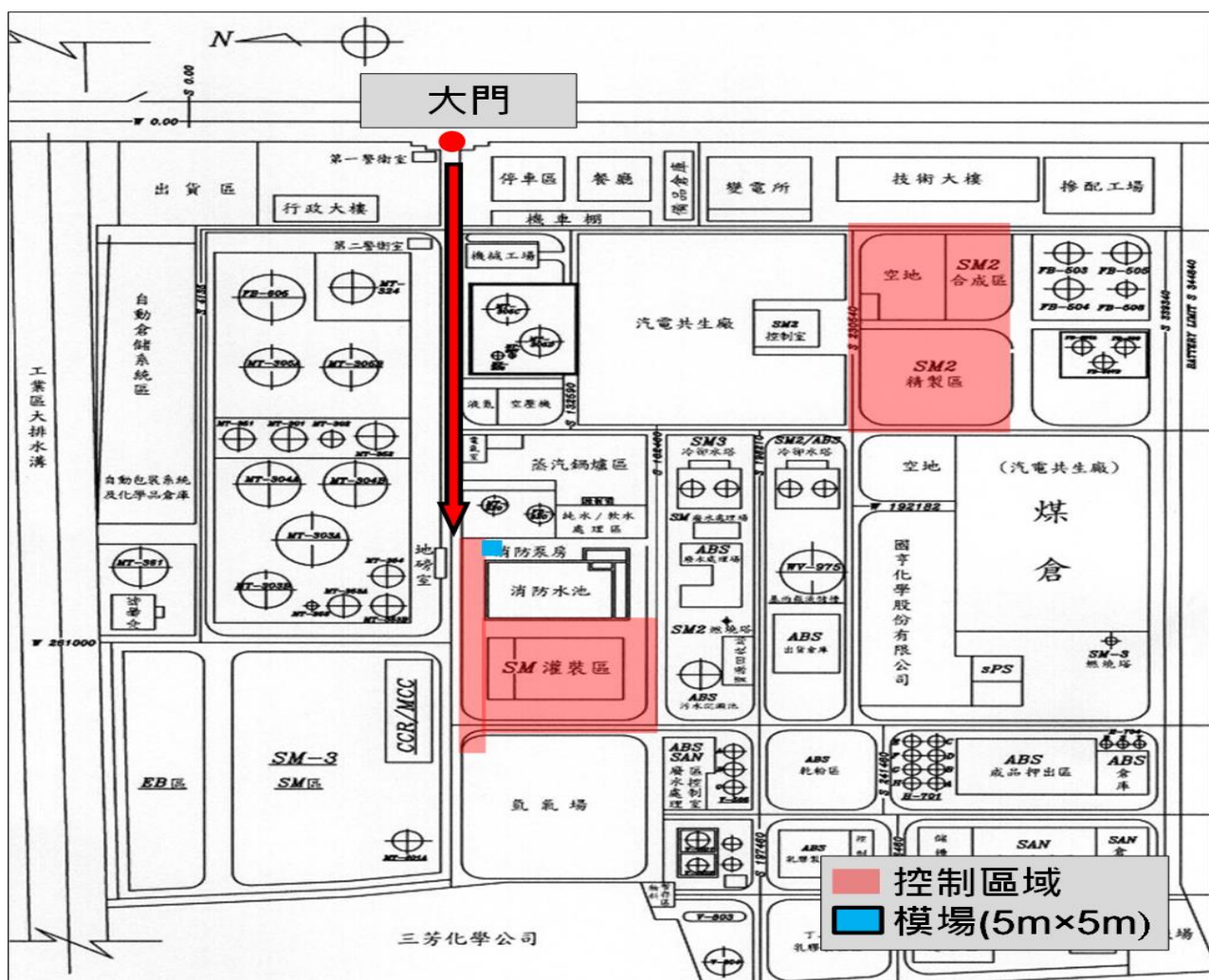


圖 3-4 模場試驗預定執行位置示意圖



(3) 井場配置與規劃

本研究第一階段模場試驗井場規劃如圖 3-5 所示，預定於場址設置 3 口注水井(GW1、GW2 及 GW3)並分別於距離注水井 0.5 公尺(MW1)及 1 公尺(MW2)處，設置水質採樣及觀測井，並於井場規劃區域外設置對照組區域。

模場試驗 I 預定進行 12 個月，前 2 個月進行井場建立與設備試車，第 3 個月至第 8 個月進行奈米氣泡水傳輸試驗，分別以氧氣與氮氣做為高溶氧與低溶氧氧奈米氣泡產生源，先注入高溶氧水，再注入厭氧氣泡水，最後以高溶氧水恢復地下環境之好氧狀況，並以不同注入頻率與時間(連續注入/12 小時間歇注入)來測試注水強度，相關參數將視現場執行進行調整，第 9 個月至第 12 個月則於高溶氧水中加入油品分解菌，進行油品分解菌添加測試。每週進行 1 次基本地下水水質參數測定(pH、ORP、DO、EC)，每個月進行 1 次地下水採樣，地下水計共 3 個採樣點，分析水中 TPH 及 VOCs。在微生物分析部份，則分別於連續注入試驗前、中、後及油品分解菌添加並操作一段時間後，針對注入井與監測井各進行 1 次微生物族群分析，功能性降解酶 qPCR 分析。

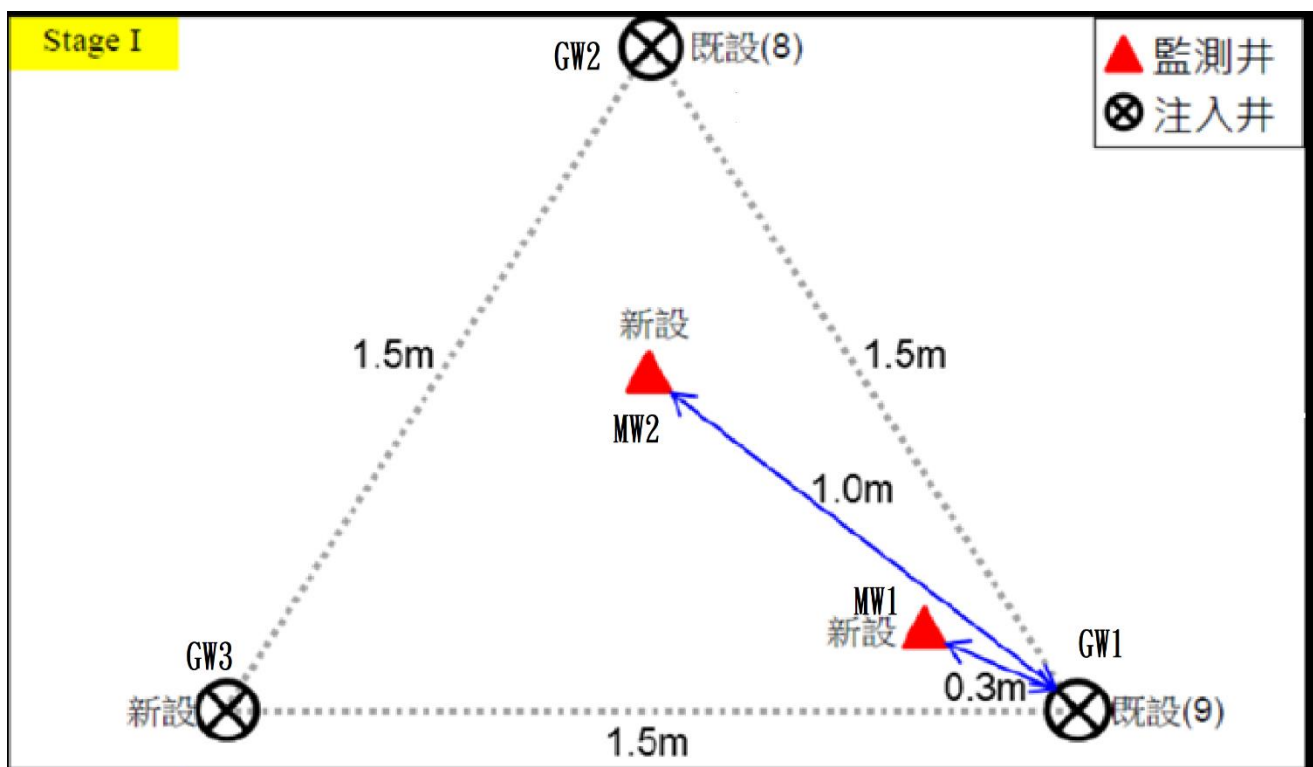


圖 3-5 第一階段模場井場規劃



3.2 實驗設備

(1) 氣相層析/質譜儀

本研究使用氣相層析/質譜儀(gas chromatograph/mass spectrometer, GC/MS) (HP 6890/5973, Agilent, USA)進行污染物之定性及定量分析，所使用的分離管柱內部管柱(capillary column DB-624, Agilent J&W, USA)，長度為 60 m，管柱內徑為 0.32 mm，薄膜厚度為 1.8 μm ，材質為 6% Cyanopropyl-phenyl、94%dimethyl polysiloxane，可使用的溫度範圍從-20 到 260°C，攜帶氣體為高純度氦氣。

(2) 平衡頂空裝置

本實驗利用平衡頂空裝置來分析水中揮發性有機待測物，使用的平衡頂空裝置(Static/Dynamic Headspace System)為 Teledyne Tekmar 公司製造，見圖 3-6，設計檢測固體基質樣品製備揮發性有機待測物前處理。其原理為土壤或地下水樣品由系統加熱平衡後，其中內含之揮發性物質由樣品中揮發成氣體狀態，在揮發性有機待測物於土壤或地下水及氣體中達到一平衡狀態，儀器利用加壓將樣品送入氣相層析儀中(行政院環保署，2002)。

平衡頂空裝置之設定條件參數如下：oven 溫度設定為 120°C；platen 平衡溫度設定為 85°C 停留 45 分鐘，樣品混合時間為 5 分鐘；transfer line 溫度設定為 120°C，使用高純度氦氣流速設定每分鐘 50 mL，以免樣品殘留在管線中；G.C. cycle 時間設定為 30 分鐘；pressurize 平衡時間為 0.50 分鐘加上 loop fill pressurize、pressurize 與 stabilize 等之時間，平衡頂空裝置處理一個樣品時間約為 1 小時。



圖 3-6 本實驗使用之 Headspace 平衡頂空裝置



(3) 高濃度氣體溶解裝置

本實驗使用的高濃度氣體溶解裝置(High Density Aero Dissolution Equipment)是日本奧誠商事株式會社出品，型號為 OD-110 (圖 3-7)，為因應本計畫使用，訂購後由日本空運來台。使用方式為將水抽入白色反應槽中並將氧氣灌入，利用白色反應槽內構造將大量氧氣溶入水中，因此所產出來的水為高溶氧水。高濃度氣體溶解裝置每小時處理水量可達2.1 噸，每日可處理水量 50 噸/天、氧氣使用量為 1.8 公斤/天，水之飽和溶氧量最高可達 55.3 mg/L。



圖 3-7 高濃度氣體溶解裝置

(4) 手提式溶氧計

本實驗使用的溶氧計(Dissolved Oxygen Meter)為美國 YSI 出品，型號為 Model 55(圖 3-8)，此溶氧測定器偵測溶氧最高值可達 20 mg/L，可能無法偵測奈米氣泡高溶氧，因此本裝置僅可使用於偵測一般水樣之溶氧量。使用方式為先確認電極薄膜與電解液是否需要更換，確認後再將溶氧測定器進行校正，其校正值符合溶氧標準值之水溫對應溶氧值後即可使用。

為測定水中奈米氣泡高溶氧，本實驗使用德國 WTW 出品，型號為 Oxi 3205 的手提式溶氧計(Handheld Oxygen Meters)，見圖 3-9，本裝置偵測溶氧最高值可達 50 mg/L，因此將本裝



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

置使用於偵測奈米氣泡高溶氧水之溶氧量。使用方式為先確認電極薄膜與電解液是否需要更換，確認後再將溶氧計進行校正，其校正值符合溶氧標準值之水溫對應溶氧值後即可使用。



圖 3-8 手提式溶氧測定器



圖 3-9 高濃度手提式溶氧計

(5) 活塞幫浦與玻璃管柱

本實驗使用的活塞幫浦(Piston Pump)與玻璃管柱(Glass Column)分別為美國 FMI 與 Thomas Scientific 出品(圖 3-10、圖 3-11)。活塞幫浦型號為 QG-6，流速可分十段調整，本實驗使用流速經測試為 1.58 mL/min。玻璃管柱內徑為 4.8 公分，長度為 15 公分，最大容量為 271 毫升，管柱兩側之濾蓋為鐵氟龍材質。



圖 3-10 活塞幫浦



圖 3-11 玻璃管柱



3.3 實驗方法

3.3.1 土壤基本性質分析

(a) 含水量

先將坩鍋以微量天秤秤重並記錄其重量，再秤取 10 g 之土壤樣品置於其中，放入 105°C 之烘箱中，持續烘乾 24 小時後，將土壤樣品移至乾燥箱中，讓土壤樣品自然冷卻後以微量天秤秤重，計算烘乾前後重量差求得含水率。

(b) 有機碳含量

取 10 g 土壤樣品置於秤重並記錄之坩鍋內，放入 105°C 的烘箱中烘乾 24 小時後，取出樣品，再放入 550°C 之高溫烘箱中連續烘 24 小時，待其冷卻後，取出樣品並稱重，計算前後的重量差即可得土壤中有機碳含量。

3.3.2 目標污染物

以場址常見之揮發性有機化合物為主，包括苯、甲苯、乙苯。原則上揮發性有機物將以 GC/MS 分析，GC/MS 儀器條件設定使用分流進樣，分流比為 20:1，管柱流速為 1 mL/min，注射口溫度為 200°C，掃描範圍為 50—650 amu，倍增器電壓為 1565 eV。起始溫度為 35°C 維持 4 分鐘，接著以每分鐘上升 5°C 的速率達 100°C，再以每分鐘上升 30°C 的速率達 220°C，於該溫度維持 5 分鐘，依此升溫模式，樣品分析共需 27 分鐘。

3.3.3 菌相分析方法

此分析之目的是要了解土壤與地下水中微生物族群之多樣性與主要出現之菌種變化。首先進行土壤樣本與地下水樣本之 DNA 萃取，針對土壤樣本之 DNA 萃取是秤取約 1 g 土壤，以 DNA 萃取套組(Power Soil DNA Isolation kit)依據產品提供之標準方法來萃取 DNA。而針對地下水樣本則是將 500 mL 地下水樣本以已滅菌 0.2 µm 孔徑的濾紙過濾後，再以同樣的 DNA 萃取套組萃取濾紙上微生物的 DNA。之後利用 UV spectrophotometer 來測定 DNA 萃取液中基因組 DNA 濃度與純度，以評估樣本中基因組 DNA 的萃取效果。

將萃取之 DNA 進行聚合酶鏈鎖反應(Polymerase chain reaction, PCR)來擴增 V3-V4 region 的序列，所使用之引子對為含 barcode 之 341F (CCTAYGGGRBGCASCAG) 與 806R (GGACTACNNGGGTATCTAAT)，PCR 反應試劑為 Phusion® High-Fidelity PCR Master Mix (New England Biolabs)。PCR 反應條件為 95°C 持續 7 分鐘，再進行 30 cycles 反應程序[i.e., 98°C 持續 10 秒(Denaturation)、50°C 持續 30 秒(Annealing)、72°C 持續 60 秒(Extension)，重覆 30



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

cycles]，最後再以 72°C 持續 5 分鐘後降溫至 4°C 來完成 PCR program。當 PCR 完成後進行 2% 瓊脂膠體電泳測試，實驗所擴增之 16S rDNA 片段大小約為 466 bp，因此如果電泳後 466 bp 的位置有 band 的話，則代表萃取樣品 DNA 為成功。

將 PCR 產物進行次世代定序(next generation sequencing)，使用定序平台為 illumina Hiseq 2500 (PE 250)系統，以 250 bp 的片段雙端讀取 16S rDNA 的 V3-V4 region (341F-806R)序列。定序前先以 NEB Next[®] Ultra[™] DNA Library Prep Kit for Illumina (NEB, USA)建立 sequencing libraries，並以 Qubit[®] 2.0 Fluorometer (Thermo Scientific) and Agilent Bioanalyzer 2100 system 來評估 library 品質。將 250 bp paired-end reads 以 FLASH (V1.2.7)整併成 Raw Tags，再利用 QIIME(V1.7.0) quality controlled process 將 Raw Tags 轉換成 Clean Tags，以 UCHIME algorithm 偵測與移除 Clean Tags 上的 chimeric sequences，而可獲得 Effective Tags。

利用 Uparse software (Uparse v7.0.1001)將所有 Effective Tags 在 ≥97% similarity 基礎上群集成不同 OTUs (Operational Taxonomic Units)，取每個 OTU 的代表序列以 GreenGene Database (based on RDP classifier, V 2.2)註解該 OUT 之 taxonomic information。利用 In-house Perl scripts 來分析 alpha (within samples)與 beta (among samples) diversity。

3.3.4 功能性降解酶分析方法

此分析之目的是要定量土壤中石化污染物功能性降解酶基因序列出現之變化，以建立石化污染物可能降解途徑。本實驗規劃偵測之降解酶有 Alkane hydroxylase、Catechol 2,3-dioxygenase、Naphthalene dioxygenase、Toluene dioxygenase、Xylene monooxygenase、Biphenyl dioxygenase、Toluene monooxygenase 與 Phenol monooxygenase，這些酶皆是柴油碳氫化合物降解流程之起始酶，透過分析這些酶的分佈情形，將可瞭解柴油在風化過程中各化合物生物降解之狀況。目前已有文獻依據具有這些酶之菌種基因序列設計該降解酶基因擴增所需之引子對(如表 3-1 所示)，多數文獻已將該引子對應用於實際污染場址之降解酶基因分析，確認具有專一性。



表 3-1 RT-PCR 實驗中相關降解基因之 primer 序列

Enzyme	Gene	Primer	Reference
Alkane hydroxylase	alkB	Forward 5'-GTTCTGGATTCCGCTCCAGAGTACG	Kok et al., 1989
		Reverse 5'-GCGCTAGTCCGTTACGATACCCAG	
Catachol 2,3-dioxygenase	XylE	Forward 5'-TGGCCGCGCATCTGAAAGGTATGG	Nakai et al., 1983
		Reverse 5'-GATATCGAT(A/C)GA(T/G)GTGTCTGGTCATG	
Naphthalene dioxygenase	NAH	Forward 5'-CAAAA(A/G)CACCTGATT(C/T)ATGG	Baldwin et al., 2003
		Reverse 5'-A(C/T)(A/G)CG(A/G)G(C/G)GACTTCTTTCAA	
Toluene dioxygenase	TOD	Forward 5'-ACCGATGA(A/G)GA(C/T)CTGTACC	Baldwin et al., 2003
		Reverse 5'-CTTCGGTC(A/C)AGTAGCTGGTG	
Xylene monooxygenase	TOL	Forward 5'-TGAGGCTGAAACTTTACGTAGA	Baldwin et al., 2003
		Reverse 5'-CTCACCTGGAGTTGCGTAC	
Biphenyl dioxygenase	BPH1	Forward 5'-GGACGTGATGCTCGA(C/T)CGC	Baldwin et al., 2003
		Reverse 5'-TGTT(C/G)GG(C/T)ACGTT(A/C)AGGCCCAT	
	BPH2	Forward 5'-GACGCCCGCCCTATATGGA	
		Reverse 5'-AGCCGACGTTGCCAGGAAAAT	
	BPH3	Forward 5'-CCGGGAGAACGGCAGGATC	
		Reverse 5'-TGCTCCGCTGCGAACTTCC	
Toluene monooxygenase	RMO	Forward 5'-TCTC(A/C/G)AGCAT(C/T)CAGAC(A/C/G)GACG	Baldwin et al., 2003
		Reverse 5'-TT(G/T)TCGATGAT(C/G/T)AC(A/G)TCCCA	
	RDEG	Forward 5'-T(C/T)TC(A/C/G)AGCAT(A/C/T)CA(A/G)AC(A/C/G)GA(C/T)GA	
		Reverse 5'-TT(A/G/T)TCG(A/G/T)AT(C/G/T)AC(A/G)TCCCA	
Phenol monooxygenase	PHE	Forward 5'-GTGCTGAC(C/G)AA(C/T)CTG(C/T)TGTTT	Baldwin et al., 2003
		Reverse 5'-CGCCAGAACCA(C/T)TT(A/G)TC	

首先利用萃取的 DNA 為模板進行相關功能性降解酶基因的 PCR 擴增來偵測是否有降解酶基因的存在。接著取 2 g 土壤以 RNA 萃取套組(Power Soil RNA Isolation kit)依據產品提供之標準方法來萃取 RNA，同時為了避免 RNA 於環境中無法保存，須馬上進行反轉錄聚合酶鏈鎖反應(Reverse transcription-PCR, RT-PCR)，其方法是利用 RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit (Thermo, EU)依據產品提供之標準方法，取 4 μ L 5X Reaction Buffer、1 μ L RiboLock RNase inhibitor、2 μ L 10X dNTP Mix、1 μ L RevertAid M-MuLV Reverse Transcriptase、1 μ L random primer 和 11 μ L RNA 配製成混合液進行 PCR，PCR 設定為先以 25°C 持續 5 分鐘之後，以 42°C 加熱 60 分鐘，最後以 70°C 加熱 5 分鐘，將 RNA 反轉錄成 cDNA，將所得的 cDNA 置於 -20°C 保存以待分析。最後分別進行 DNA 及 cDNA 的 real-time PCR 降解酶基因的 copy numbers 的測定。

本實驗 real-time PCR 所使用的機型為 LightCycler[®] 1.5 Instrument (Roche, USA)，採用的 kit 為 LightCycler[®] FastStart DNA Master PLUS SYBR Green I (Roche, Germany)，包含 vial 1a (LightCycler[®] FastStart Enzyme)、vial 1b (LightCycler[®] FastStart DNA Master PLUS Reaction Mix)、vial 2 (H₂O, PCR-grade)，使用時先取 14 μ L 的 vial 1a 加入 kit 套組內的 vial 1b 管中混合成試劑



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

vial 1(LightCycler® FastStart DNA Master PLUS SYBR Green I Master Mix)，vial 1 於實驗過程中都需避光；然後取 5 μ L DNA 樣本，加入 9 μ L vial 2、4 μ L vial 1 與 2 μ L PCR primer mix (最終濃度介於 0.2 至 1 μ M)，均勻混合後置入專用毛細管中。將含反應物之專用毛細管放入 LightCycler® 1.5 Instrument，如表 3-2 所示。

設定 real-time PCR 反應條件(如表)為 95°C持續 10 分鐘的 Preincubation 階段；之後進行 95°C持續 10 秒、依照 PCR primer 的 annealing 溫度持續 10 秒、72°C持續之時間為 PCR 的產物 DNA bp 數/25 秒(單點收光)，此階段共計 45 個循環；再進行 95°C持續 0 秒、65°C持續 60 秒、95°C持續 0 秒(以每秒 0.1°C的速率自 65°C升溫，並連續收光)，此階段共計 1 個循環；最後再以 40°C持續 30 秒鐘的降溫。將各樣本中所含目標基因於 real-time PCR 過程中產出螢光值以 GADPH housekeeping gene 螢光值進行校正後，相對於校正後的控制組(未污染土)中所含目標基因產出螢光值，以 LightCycler® software 4.1 (Roche, Germany)軟體進行相對定量分析，計算其相對比值。

表 3-2 RT-PCR 反應條件

	Temperature	Time	Cycle numbers	Acquisition mode
Preincubation	95°C	10 mins	1 cycle	none
Quantification	95°C	10 sec	45 cycles	none
	primer annealing Temp.	10 sec		none
	72°C	$= \frac{\text{amplicon[bp]}}{25}$ sec		single
Melting curve	95°C	0 sec	1 cycle	none
	65°C	15 sec		none
	95°C (Tamp Rate = 0.1°C/sec)	0 sec		continuous
Cooling	40°C	30 sec	1	none

3.3.5 土壤及地下水採樣方法

本計畫之地下水採樣乃依環檢所最新公告之「監測井地下水採樣方法(NIEA W103.54B)」，以抽水機或貝勒管(Bailers)做為採樣設備，在品保品管的規範下，進行地下水採樣，以確保採得具有代表性之地下水水樣。



3.4 實驗品保/品管

(1) VOCs 檢量線製備

VOCs 標準混合液 1 mL 中，每種化合物之濃度皆為 2000 mg/L。將 2000 mg/L 之標準液以甲醇稀釋為高濃度儲備溶液後，儲存於-20℃的冰箱中，待測時自冰箱中取出，以去離子水將之稀釋成 0.030 mg/L、0.040 mg/L、0.050 mg/L、0.080 mg/L、0.100 mg/L、0.200 mg/L、0.400 mg/L 及 0.500 mg/L 八種濃度，以 GC/MS 進行定性及定量分析。

(2) 方法偵測極限

首先以實驗室標準品製作標準濃度檢量線，之後配置七個標準品，經過完整分析步驟，將此分析值經過運算，可得到標準偏差(standard deviation, SD)，3.14 倍標準差即為此研究之初步方法偵測極限。確認 MDL 之計算為將各個最低濃度之標準品進行第二次分析，計算其變異度(S^2)，與前次分析之 S^2 值比較，將較大值記為 S_A^2 為分子，較小值為 S_B^2 ，若 $S_A^2/S_B^2 < 3.05$ ，則利用下述公式(1)計算共同標準偏差(Pooled standard deviation, Spooled)。最後以公式(2)將 Spooled 之值代入，即可求出 MDL。

$$S_{pooled} = \left[\frac{6S_A^2 + 6S_B^2}{12} \right]^{1/2} \text{----- (1)}$$

$$MDL = 2.681 \times S_{pooled} \text{----- (2)}$$

(3) 精密度(Precision)

精密度為一批次重複分析所得到測量值之間的差異性，一般而言會重複分析相同濃度的標準溶液七次，計算所得結果的平均值與標準偏差，再將標準偏差值除以平均值，所得之值稱為相對標準偏差(RSD)，以此表示分析系統的精密度，其值必須低於 25%。

$$\text{相對標準偏差(RSD, \%)} = (\text{標準偏差/平均值}) \times 100\%$$

本研究分析校正曲線最低濃度七次，將所得結果依照上式計算本方法之精密度。

(4) 準確度(Accuracy)

為一批次所得之分析平均值與真值的差異程度，以百分比表示，需低於 30%，計算公式如下：

$$\text{準確度(Accuracy)} = | \text{分析平均濃度} - \text{配製理論濃度} | / \text{配製理論濃度} \times 100\%$$

本研究取校正曲線的最低濃度並分析七次，並將所得結果依照上式計算之。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

(5) 回收率(Recovery)

使用 VOCs 分別以甲醇配製成濃度為 100 $\mu\text{g/mL}$ 之溶液，秤取 10 g 之配製土壤加入 1 mL 溶液並攪拌均勻，進行連續萃取，所得結果以 GC/MS 分析，再對照原加入之目標污染物濃度可得其回收率。

3.5 進度及預期完成之工作項目

本計畫研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)如表 3-3 所示。



表 3-3 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)

<div>月</div> <div>工作項目</div>	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	備註
(一)奈米氣泡水量測技術建立													
(二)高濃度氣體溶解裝置設立及試車													
(三)管柱試驗													
1. 奈米氣泡流布試驗													
(四)砂箱試驗													
1.奈米氣泡流布試驗													
(五)模場試驗													
1.注水井與觀測井建置													
2.注水設備建置與設備試車													
3.第一階段模場試驗													
4.抽水井設置與抽水設備安裝													
5.抽注井場試車與操作最佳化													
6.第二階段模場試驗													
成果報告													
工作進度估計百分比 (累積數)	5 %	10 %	25 %	30 %	40 %	50 %	55 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	
預定查核點	期中	(1) 高濃度氣體溶解裝置建置及試車。 (2) 建立高濃度氣體溶解裝置基本操作參數。 (3) 以奈米氣泡水進行管柱及沙箱實驗											
	期末	(1) 模場試驗注入井與監測井設置，設備安裝及試車。 (2) 確認水文地質參數，注水操作條件。											

說明：

1、工作項目請視專案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。





第四章、結果與討論

本計畫目的為建立超高溶氧奈米氣泡現地生物整治技術井場配置之最佳化條件，依實驗室試驗所建立之曝氣條件與水中溶氧量之變化，以便於現場進行測試與觀察奈米氣泡於地下環境的傳輸狀況，同時確認模場環境中污染物濃度的變化，並進行質量平衡計算及微生物族群變化、石油碳氫化合物功能性降解酶之變化，以確認生物整治之成效。

4.1 奈米氣泡水之量測技術校正

由於一般環境監測所使用之 YSI 溶氧計僅能偵測到之溶氧濃度最大值為 20 mg/L，因此只能使用於飽和溶氧水，但無法偵測到超高溶氧奈米氣泡水之溶氧量測值，所以必須使用另一型 WTW 溶氧計來偵測超高溶氧水，此溶氧計能偵測到最高濃度為 50 mg/L，可以使用於高溶氧水中，因此在溶氧分析工作中一般使用 YSI 溶氧計於飽和溶氧水中測定，而使用 WTW 溶氧計於超高溶氧奈米氣泡水。

為了確認兩台溶氧計之測值是否有所差別，因此將兩台溶氧計同時放入飽和溶氧水中並於每十秒偵測一次數值，以做為比較，所得數值如圖 4-1 所示，可發現兩台所測得的值差異不大，而差值最大值是在第 10 秒時相差 0.13 mg/L，而之後測值相差均低於 0.13 mg/L。從 YSI 與 WTW 溶氧計在飽和溶氧水所得溶氧量測值之比較可得知其測值具相容性。

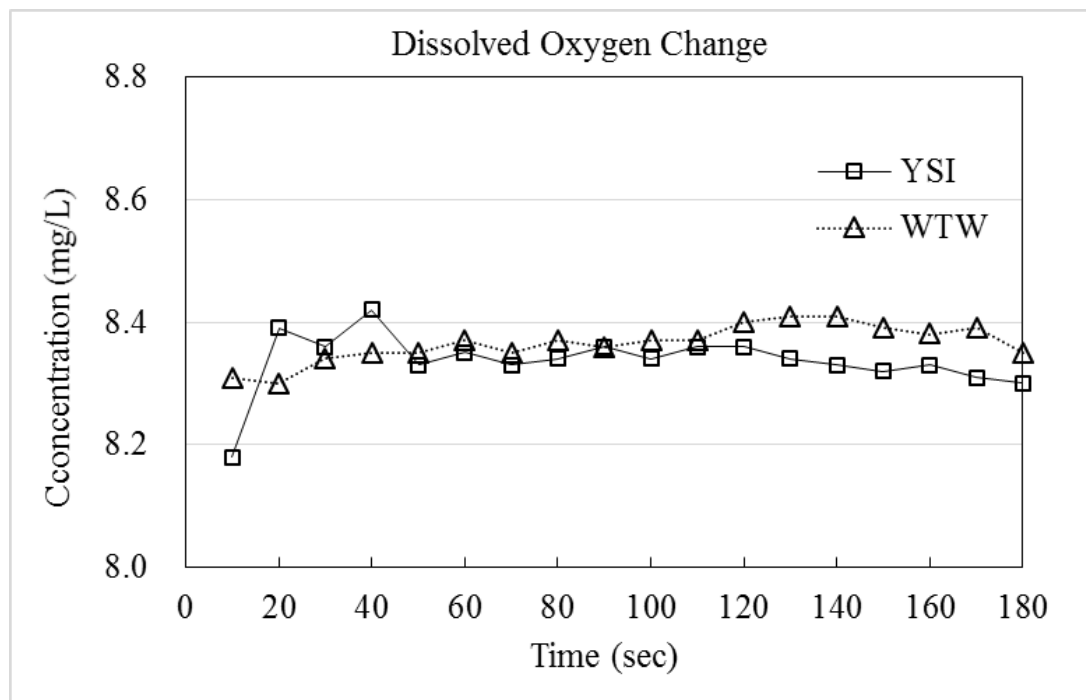


圖 4-1 不同溶氧計測值之變化



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

4.2 飽和溶氧水之管柱試驗

實驗室試驗的第一階段為進行玻璃管柱試驗，以填充土壤的玻璃管柱模擬飽和溶氧地下水於地下環境中伴隨時間之溶氧變化量，故以內徑為 4.8 cm、長度為 15 cm 之玻璃管柱緊實填充供試土壤，模擬未受污染的地下環境(如圖 4-2)。兩側蓋上附有鐵氟龍濾網之塞蓋後稱重紀錄，一端接上幫浦(piston pump)以 0.576 mL/min 流速之 0.01 N 氯化鈣(CaCl_2)溶液沖洗填充供試土壤 4 小時，使管柱成為飽和狀態，藉以模擬土壤之飽和層(saturated zon)。靜置 24 小時後稱重，二次稱重之重量差即為管柱中孔隙體積，水平管柱之孔隙體積為 97.6 mL，而垂直管柱之孔隙體積為 87.6 mL。飽和溶氧水之管柱基礎資訊如表 4-2 所示。

實驗設計以定量 pump 將飽和溶氧水持續注入管柱，並持續收集 20 mL、40 mL、60 mL 及 80 mL 流出液，並檢測及記錄其溶氧，繼續使用 pump 將飽和溶氧水注入管柱一段時間，以確保管柱中之飽和溶氧水為新注入，並且無前次試驗之殘留地下水，靜置一段時間，以做為觀察地下水不同滯留時間下其溶氧變化。

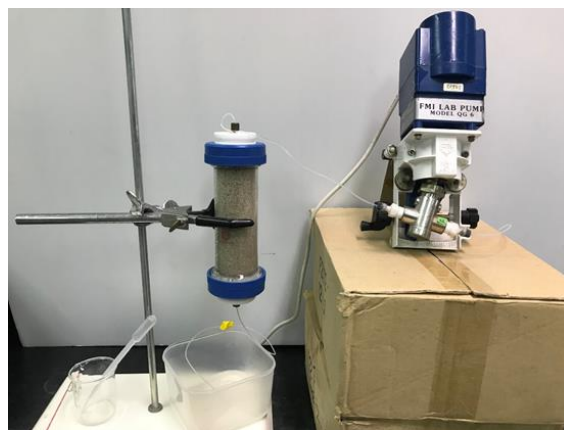
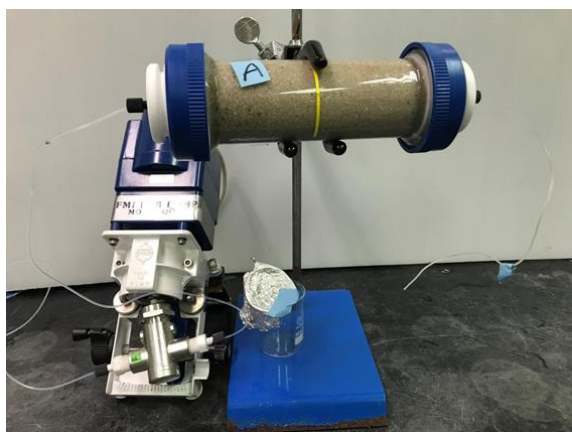


圖 4-2 水平管柱與垂直管柱

表 4-1 飽和溶氧水之玻璃管柱基礎資訊

	管柱空重(g)	管柱+土壤重(g)	管+土壤+水重(g)	孔隙體積(mL)
A 管柱(水平)	570.3	988.7	1086.3	97.6
B 管柱(垂直)	600.1	1015.6	1103.2	87.6
Pump 之流速(mL/min)	1.58			



4.2.1 飽和溶氧水之水平管柱溶氧變化

本實驗經由 pump 注入飽和溶氧水至水平管柱，陸續觀察 24 hr、48 hr、72 hr、96 hr 及 120 hr 水中之溶氧變化，於表 4-2 之平均值可得知，飽和溶氧水於管柱中滯留時間越久，所測得之溶氧值越低，其誤差約為 0.05—0.45 之間，此實驗結果試驗證明溶氧於密閉環境中持續時間越長，其溶氧濃度越低，歷經 120 小時溶氧約下降 1.85 mg/L，此參數可做為模場試驗之參考。

從不同時段觀察飽和溶氧水，滯留時間在 24 hr 至 72 hr，其溶氧量損失約 1.00 mg/L，而經滯留時間 96 hr 與 120 hr，其溶氧量損失分別約 1.98 mg/L 與 1.90 mg/L，可見水平管柱之溶氧量在 72 hr 以前溶氧消散較平緩，而在 96 hr 後溶氧開始持續消散。在 24 hr 至 48 hr 期間其溶氧變化量減少 0.98 mg/L，但 48 hr 至 96 hr 期間可發現到其溶氧量變化並不大，直到 120 hr 之溶氧量又開始消散 0.63 mg/L，可觀察到飽和溶氧水在水平管柱中滯留時間 48 hr 至 96 hr 之溶氧量可保持一定濃度後，才又持續消散。

表 4-2 水平管柱中飽和溶氧水之溶氧變化

水平管柱									
滯留時間 (hr)	溫度 (°C)	溶氧計 飽和溶氧 校正值 (mg/L)	飽和溶氧水 實際溶氧 (mg/L)	經 pump 後溶氧 (mg/L)	管柱 流出液 20 mL (mg/L)	管柱 流出液 40 mL (mg/L)	管柱 流出液 60 mL (mg/L)	管柱 流出液 80 mL (mg/L)	平均 (mg/L)
24	21.9	8.71	8.61	7.87	7.69	7.05	7.00	7.62	7.34
48	21.6	8.82	8.06	7.37	6.25	6.22	6.41	6.56	6.36
72	23.2	8.51	8.61	7.28	6.53	6.20	6.03	6.81	6.39
96	25.0	8.27	8.31	8.10	6.07	5.92	6.30	6.20	6.12
120	21.6	8.86	8.36	7.39	5.94	5.30	5.30	5.40	5.49

4.2.2 飽和溶氧水之垂直管柱溶氧變化

本實驗經由 pump 注入飽和溶氧水至垂直管柱觀察 24 hr、48 hr、72 hr、96 hr 及 120 hr 之溶氧變化，於表 4-3 之平均值可得知溶氧濃度於管柱中時間越久，所測得之讀值越低，本實驗之誤差約於 0.02—0.42 之間，以此實驗結果證明溶氧於密閉環境中持續時間越長，其溶氧濃度越低，此結果與水平管柱之溶氧變化狀況相同。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

從不同時段觀察垂直管柱飽和溶氧水滯留時間，在 24 hr 至 72 hr 其溶氧量損失約 0.6 mg/L 至 1.05 mg/L，而經滯留時間 96 hr 與 120 hr，其溶氧量損失分別約 0.4 mg/L 與 1.05 mg/L，相對而言，垂直管柱之溶氧量消散較慢。比較水平及垂直狀態後發現，垂直管柱之溶氧變化較為緩和，歷經 120 小時溶氧約下降 1.39 mg/L，故推測垂直狀態下之溶氧較不易消散。

表 4-3 飽和溶氧水之垂直管柱不同時段之溶氧變化

垂直管柱									
滯留時間 (hr)	溫度 (°C)	溶氧計飽和溶氧校正值 (mg/L)	飽和溶氧水實際溶氧 (mg/L)	經 PUMP 後溶氧 (mg/L)	管柱流出液 20 mL (mg/L)	管柱流出液 40 mL (mg/L)	管柱流出液 60 mL (mg/L)	管柱流出液 80 mL (mg/L)	平均 (mg/L)
24	21.9	8.71	8.61	8.28	8.05	7.38	7.41	7.93	7.69
48	21.6	8.82	8.34	7.34	7.01	6.97	6.66	6.80	6.86
72	22.1	8.72	8.47	7.85	7.26	6.67	6.77	6.67	6.84
96	22.0	8.74	8.32	7.35	7.10	6.75	6.85	6.88	6.90
120	21.6	8.86	8.51	7.35	6.22	6.38	6.17	6.41	6.30



4.3 高溶氧水之管柱試驗

4.3.1 高溶氧水製程時間

藉由 100 公升水箱(80 cm×60 cm×21 cm)經高濃度氣體溶解裝置循環製造高濃度溶氧水，高濃度氣體溶解裝置其製造高溶氧水之效率如表 4-4，本實驗測試製造時間分別以 5、10、15、20、30 與 60 分鐘來觀察溶氧濃度變化，可發現 5 分鐘後，水中溶氧濃度提高至 29.3 mg/L，已高於一般常溫之飽和溶氧 3 倍左右。經 10 分鐘與 15 分鐘後之水中溶氧濃度只提升到 35.3 mg/L 及 35.9 mg/L，到 30 分鐘提升到 40.9 mg/L，但經 60 分鐘偵測水中溶氧濃度是 39.4 mg/L，從 30 分鐘至 60 分鐘由裝置不斷循環增加奈米氣泡及水中溶氧量，但卻沒有比 30 分鐘所測得的溶氧量高，因此本試驗高溶氧水之製程時間選擇 30 分鐘，溶氧濃度大於 40.9 mg/L 以進行管柱、砂箱試驗及高溶氧水於開放狀態與密閉狀態條件之衰變試驗。

表 4-4 高溶氧水製程時間對應溶氧濃度

Time (min)	0	5	10	15	20	30	60
溶氧值(mg/L)	9.37	29.3	35.3	35.9	36.2	40.9	39.4

4.3.2 高溶氧水之水平管柱溶氧變化

本實驗經由 pump 注入高溶氧水至水平管柱觀察 24 hr、48 hr、72 hr、96 hr 及 120 hr 之溶氧變化，高溶氧水雖濃度高達 42.2 mg/L，但經 pump 傳輸前即已造成損耗，濃度約降為 27 mg/L。由表 4-5 之結果可得知，注入水經滯留時間 24 hr 後所偵測到的溶氧值為 10.8 mg/L，在前二十四小時溶氧劇烈減少，從 27 mg/L 降至 10 mg/L，但此後溶氧減少就趨於和緩，滯留時間 96 hr 後所偵測到的溶氧值 9.24 mg/L，但可見高溶氧水在水平管柱中傳輸會造成溶氧損失，仍是高於飽和溶氧水，歷經 120 小時高溶氧水仍能維持原溶氧之 80%以上。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

表 4-5 高溶氧水在水平管柱之溶氧變化

水平管柱									
滯留時間 (hr)	溫度 (°C)	溶氧計飽和溶氧校正值 (mg/L)	飽和溶氧水實際溶氧 (mg/L)	經 pump 後溶氧 (mg/L)	管柱流出液 20 mL (mg/L)	管柱流出液 40 mL (mg/L)	管柱流出液 60 mL (mg/L)	管柱流出液 80 mL (mg/L)	平均 (mg/L)
24	23.5	8.30	42.2	27.5	10.3	10.9	10.8	11.2	10.8
48	24.4	8.29	41.9	27.3	9.55	9.96	10.5	10.4	10.1
72	23.1	8.51	47.4	27.1	10.3	10.6	10.4	10.3	10.4
96	22.8	8.50	45.6	22.7	8.63	9.30	9.57	9.47	9.24
120	22.1	8.70	40.2	20.3	7.84	8.30	8.49	8.39	8.26

4.3.3 高溶氧水之垂直管柱溶氧變化

本實驗經由 pump 注入高溶氧水至垂直管柱觀察 24 hr、48 hr、72 hr、96 hr 及 120 hr 之溶氧變化，與水平管柱實驗類似，高溶氧水雖濃度高達 42.2 mg/L，但經 pump 傳輸前即已造成損耗，濃度約降為 27 mg/L。

由表 4-6 之結果可得知，與水平管柱實驗類似，高溶氧水在垂直管柱中傳輸會造成溶氧損失，注入水經滯留時間 24 hr 後所偵測到的溶氧值為 9.38 mg/L，在前二十四小時溶氧劇烈減少，從 27 mg/L 降至 9 mg/L，但此後溶氧減少就趨於和緩，滯留時間 120 hr 後所偵測的溶氧值 8.54 mg/L，仍是高於飽和溶氧水。

表 4-6 高溶氧水在垂直管柱之溶氧變化

垂直管柱									
滯留時間 (hr)	溫度 (°C)	溶氧計飽和溶氧校正值 (mg/L)	飽和溶氧水實際溶氧 (mg/L)	經 pump 後溶氧 (mg/L)	管柱流出液 20 mL (mg/L)	管柱流出液 40 mL (mg/L)	管柱流出液 60 mL (mg/L)	管柱流出液 80 mL (mg/L)	平均 (mg/L)
24	23.5	8.30	42.2	27.9	9.44	9.24	9.33	9.51	9.38
48	24.4	8.29	41.9	26.5	9.48	9.02	9.72	9.84	9.52
72	23.1	8.51	47.4	28.2	9.64	9.99	9.39	8.99	9.50
96	22.8	8.50	45.6	22.3	8.29	8.50	8.65	8.79	8.56
120	22.1	8.70	40.2	20.5	8.83	8.47	8.35	8.52	8.54



4.4 高溶氧水之砂箱傳輸試驗

砂箱長、寬、高分別為 60 公分、51 公分、65 公分，砂箱內插入 6 支篩管作為偵測溶氧量之孔，砂箱每 15 公分處放入一支篩管，每支篩管編號(圖 4-3)，砂箱內填沙高度為 40 公分，將高溶氧水由砂箱左邊開始灌入，等水位達到 20 公分即停止灌水，並每天檢測各編號篩管之溶氧量持續 16 天。

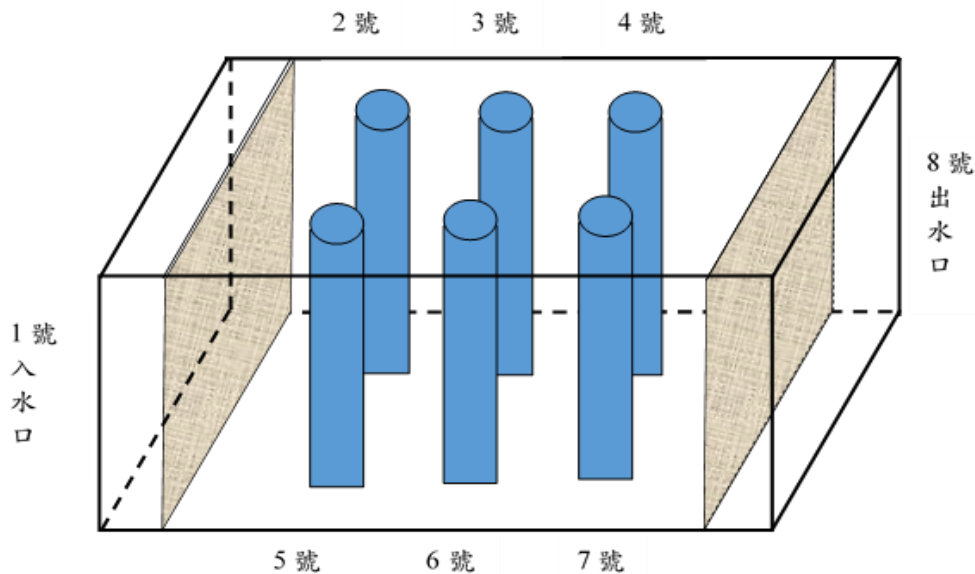


圖 4-3 砂箱之篩管編號與位置示意圖

砂箱之各位置之溶氧之數據見表 4-8 與表 4-9，一開始高溶氧水之溶氧量濃度偵測為 40.2 mg/L，從 1 號開始灌入高溶氧水，經過砂箱內到 8 號為出水口，從由入水口至出水口的距離可觀察到各個篩管內偵測到高溶氧水的濃度會因距離而逐漸減少，高溶氧水由 1 號入水口至 8 號出水口僅 60 公分之距離，並於其中填滿均質之石英砂，但其溶氧濃度減少 22.8 mg/L，8 號出水口經偵測後高溶氧水之溶氧量只剩 17.4 mg/L，僅剩原注入濃度之 40%。

各篩管在第一天其溶氧降低最多，在 96 小時後，溶氧僅剩原始之 40%，第四天至第十六天其溶氧減少呈現趨緩，從不同天數觀察各篩管內之高溶氧水變化，可看出溶氧量消耗速度並不快，2 號、3 號、5 號與 6 號篩管在第十一天後才會到達飽和溶氧水的濃度，4 號與 7 號則因距離傳輸使一開始溶氧量不高而在第三天就到達飽和溶氧水的濃度。從表 4-7 與表 4-8 之濃度來看，2 號與 5 號樣點距離 1 號注入口較近，地下水傳輸距離較短，因此溶氧值較高，而 4 號與 7 號之溶氧值就較少，且從距離對應天數來看，不同距離之溶氧量消散速度不同。從各



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

對應篩管來看溶氧量消耗速度，更可發現傳輸距離越遠，其位置溶氧量會越少且消耗速度快，因傳輸距離與介質使水中溶氧量之穩定性受到影響。

表 4-7 砂箱系列篩管溶氧變化量

篩管編號 天數	溶氧濃度(單位：mg/L)				
	1	2	3	4	8
0	40.2	30.7	25.4	21.2	17.4
1	23.0	19.8	16.7	11.8	12.7
2	18.5	18.6	14.8	11.4	11.0
3	13.2	13.3	10.7	8.43	8.80
4	10.8	14.1	10.4	7.46	7.64
5	9.89	17.8	11.3	6.59	7.36
6	9.56	12.3	11.8	5.62	7.11
7	12.4	10.9	7.61	7.01	6.02
8	9.75	10.0	9.37	5.60	6.35
9	10.2	10.4	11.4	6.05	5.96
10	9.26	9.88	7.57	5.67	5.98
11	8.73	9.70	9.71	4.20	5.90
12	9.10	8.74	5.73	3.47	7.34
13	8.22	7.89	5.77	2.90	6.63
14	8.22	8.28	5.94	3.84	5.88
15	8.74	8.04	5.32	2.38	7.52
16	7.83	8.55	6.87	3.55	6.35



表 4-8 砂箱系列篩管溶氧變化量

篩管編號 天數	溶氧濃度(單位：mg/L)				
	1	5	6	7	8
0	40.2	29.5	24.9	18.9	17.4
1	23.0	18.7	15.2	13.2	12.7
2	18.5	18.3	14.6	9.91	11.0
3	13.2	14.7	10.1	8.23	8.80
4	10.8	14.6	10.0	7.24	7.64
5	9.89	14.4	9.41	6.62	7.36
6	9.56	13.8	9.82	5.86	7.11
7	12.4	9.30	8.13	6.05	6.02
8	9.75	11.3	7.26	5.40	6.35
9	10.2	10.6	10.0	2.77	5.96
10	9.26	9.25	8.05	5.98	5.98
11	8.73	9.75	8.24	4.40	5.90
12	9.10	10.6	5.11	3.03	7.34
13	8.22	9.87	5.49	1.70	6.63
14	8.22	10.4	5.09	2.22	5.88
15	8.74	10.3	4.83	1.27	7.52
16	7.83	10.9	5.77	2.91	6.35



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

從圖 4-8 可觀察出各編號篩管之溶氧濃度隨天數逐漸下降，且 4 號與 7 號篩管因傳輸距離較遠，所以在第三天時水中溶氧量就到達飽和溶氧水的濃度，從距離較近的 2 號與 5 號之溶氧量變化，發現到第十一天時才會到達飽和溶氧水的濃度，砂箱試驗觀察到高溶氧水會因傳輸距離越長而減少水中溶氧量，其溶氧遞減率可做為未來污染場址實場操作之參考。

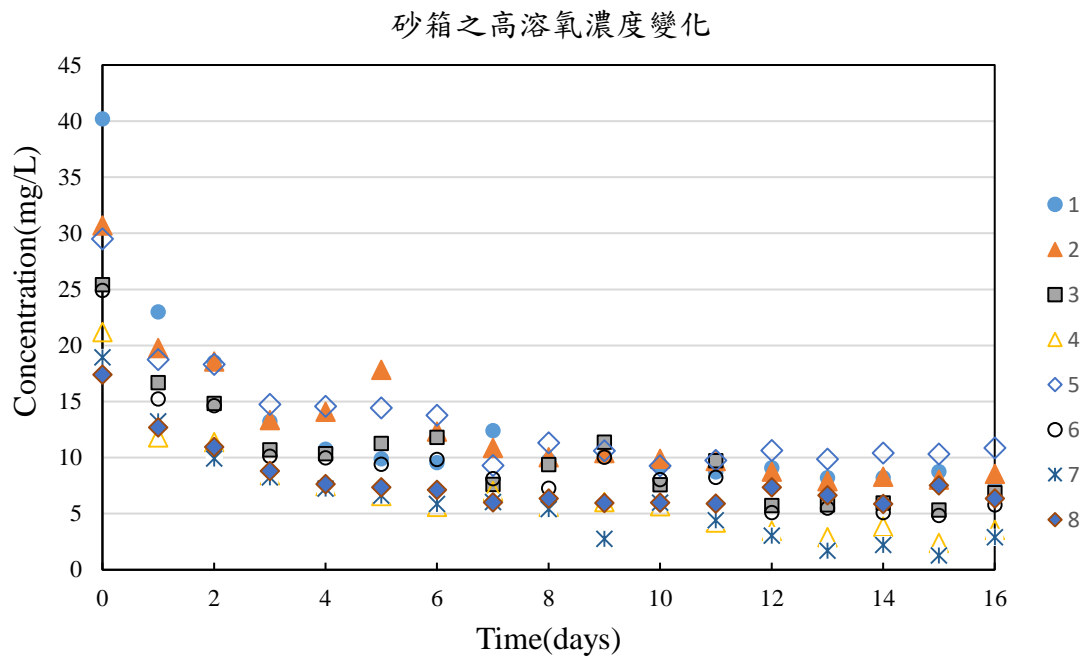


圖 4-4 砂箱各測點之溶氧濃度變化



4.5 高溶氧水在開放與密閉環境條件之溶氧變化

本實驗觀察高溶氧水在開放與密閉的環境下溶氧之變化量，以做為實場操作時高溶氧水製造與保存方式之參考。實驗組別編號 A 與 B 為開放狀態，實驗組別編號 C 與 D 為密閉狀態，如表 4-9 所示，試驗開始時水中之溶氧濃度均高於 35.0 mg/L，一般認為開放環境溶氧消耗會比密閉環境還要快，但從本試驗之數據觀察來看，兩種環境下之溶氧遞減速度差異不大，雖然一開始密閉環境所偵測到之溶氧濃度比開放環境要高，經過一天後之溶氧減少約 20—30%，但從第三天觀察起，可發現兩者之溶氧量消耗速度大致相同，由高溶氧水濃度消散至飽和溶氧水僅需八天，實驗至第八天可發現兩個條件之溶氧濃度皆接近大氣飽和溶氧濃度。開放環境與密閉環境的條件下之溶氧量消散至飽和溶氧水之溶氧量的天數也是一樣，而之後開放與密閉的溶氧量皆維持在一定濃度，長期觀察 20 天發現兩者溶氧並無顯著差異。

表 4-9 高溶氧水在開放與密閉條件之不同天數溶氧變化

編號 天數	單位：mg/L				編號 天數	單位：mg/L			
	A	B	C	D		A	B	C	D
0	35.6	35.3	39.5	37.9	11	8.15	8.17	8.15	7.85
1	28.1	26.0	28.5	27.6	12	8.04	8.39	8.25	8.19
2	20.4	20.8	21.3	20.6	13	8.05	8.03	8.04	8.11
3	20.0	20.4	20.4	20.6	14	7.92	7.98	8.03	7.97
4	12.3	12.4	13.1	12.6	15	8.16	7.97	8.08	8.15
5	10.7	10.8	11.2	11.3	16	8.26	8.17	8.38	8.26
6	9.75	9.83	10.3	10.2	17	7.99	8.04	8.35	8.41
7	8.96	9.16	9.50	9.45	18	7.87	7.85	7.96	8.04
8	8.32	8.43	8.72	8.57	19	8.02	8.22	8.39	8.61
9	8.22	8.24	8.32	8.30	20	8.07	7.84	7.73	7.74
10	8.07	8.11	8.18	8.11					



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

4.6 模場試驗之設備建置

本計畫於 2018 年 10 月試驗場址中進行注入高溶氧水，以觀測是否能使地下環境中之石化分解菌增生，使之達成降解污染場址中之污染物降解，並使場址之污染濃度下降。試驗之場址位於圖 4-5 中灰色區塊位置。本試驗於 2018 年 8 月開始進行試驗場地之設備建置，將主要使用之高濃度氣體溶解裝置安裝並且試車完畢(圖 4-6)，以及建置 2 口監測井及 3 口注水井(圖 4-7、圖 4-8)。

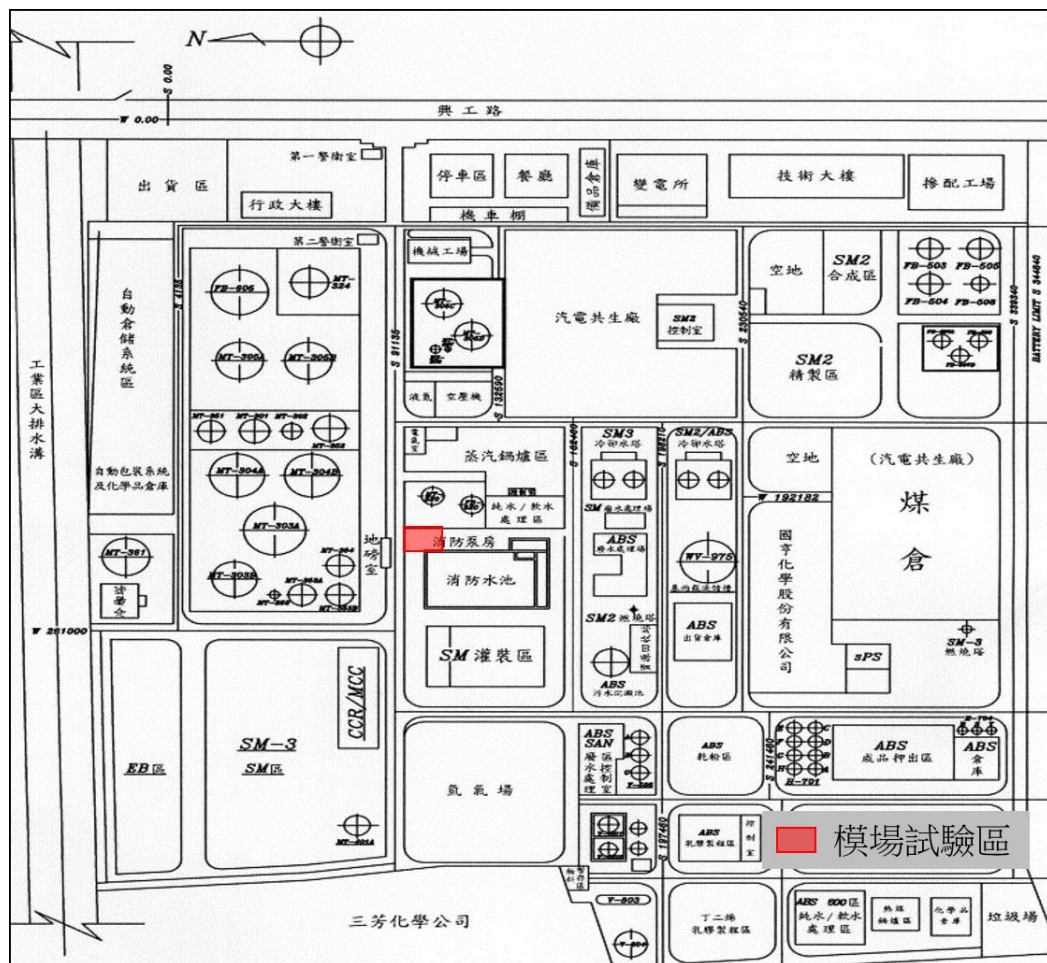


圖 4-5 實驗模場位置



圖 4-6 模場試驗之設備建置



圖 4-7 注入井及監測井



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫



(a) GW1



(b) GW2



(c) GW3



(d) MW2

圖 4-8 注入井及監測井之建置情形



4.7 污染場址之基線資料建立

本計畫於 2018 年 9 月 7 日至污染場址進行第一次採樣蒐集基線資料，以利於後續實驗之進行比對。本次採樣採集土壤及地下水，並且進行酸鹼值、總氮、總磷及菌相分析，採集之點位如圖 4-9 所示。土壤採集 3 個點位，編號分別為 S1、S2 及 S3 (圖 4-10)，其深度為 4 至 6 米並以每 50 公分為一單位，共有 12 組土壤樣本，而地下水則採集 5 點，編號為 GW1、GW2、GW3、MW1 及 MW2 (圖 4-11)。

為了解試驗場址中土壤及地下水之基本資訊，將採集之土壤及地下水樣本分別進行酸鹼值、總氮、總磷以及菌相之分析。

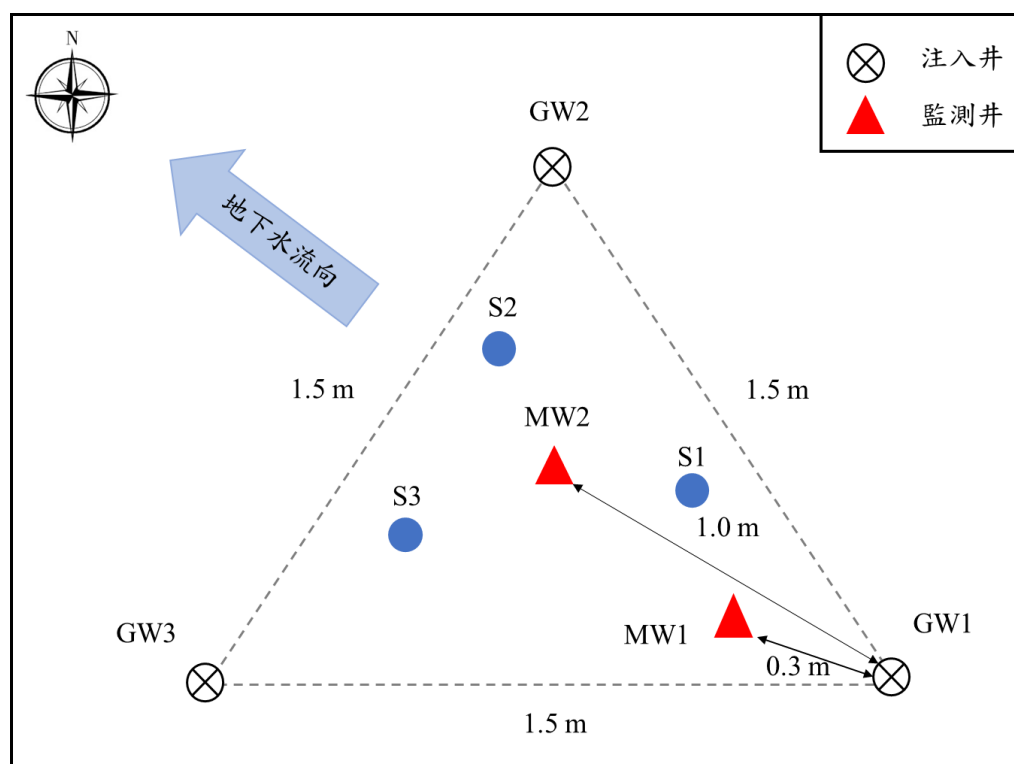


圖 4-9 採樣點位及編號



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫



圖 4-10 土壤樣品



圖 4-11 地下水樣品



4.7.1 土壤之基線資料分析

土壤樣品分別為 S1、S2 及 S3，採樣深度為 4—6 米，並且每 50 公分收取一段土壤，每個採樣點共有 4 段土壤，編號分別為 S1-1、S1-2、S1-3、S1-4、S2-1、S2-2、S2-3、S2-4、S3-1、S3-2、S3-3 及 S3-4 共 12 的點位，分析時進行 2 重複，結果列於表 4-10、表 4-11。

酸鹼值為土壤的基本特性，亦是影響生物生長於地下環境中的重要因素之一，土壤微生物一般最適宜之酸鹼值為 6.5—7.5 之間的中性範圍，土壤酸鹼值如過酸或過鹼均會抑制土壤中微生物之生長及活動。由實驗數據中可發現此場址之土壤酸鹼度約為 6.54—7.72 之間，平均為 7.40，土壤之酸鹼值為中性，依前所述，此酸鹼值環境適合土壤中微生物生長。

氮為微生物生長之必要元素之一，土壤中之氮含量通常介於 0.02%(土壤底土層)至 2.5%(泥炭土)之間，主要以有機態存在(賴，2011)。而於本場址中所得之試驗結果範圍約為 0.008—0.027%之間，平均為 0.015%，此地下環境中之氮含量略低於一般土壤之含氮量。

磷元素在土壤中移動性較低，其會鍵結或沉澱於土壤黏粒、有機質及礦物質之表面上，故磷元素不易因淋融作用及地下水流動而流失，其在土壤中之濃度約為 600 mg/kg (Lindsay, 1979)。於本實驗之分析結果中發現此區之總磷濃度範圍約為 241—444 mg/kg，平均為 390 mg/kg，此地下環境中之磷含量低於一般土壤之含磷之平均濃度。

於本次採樣亦針對此污染場址之污染物苯(Benzene)、甲苯(Toulene)、乙苯(Ethylbenzene)及苯乙烯(Stryene)進行污染濃度分析，同一樣點之分析均採 2 重複進行確認。由數據中可發現乙苯之污染濃度為最高，其次則為苯，其中乙苯污染濃度範圍為 1376—11083 mg/L，遠高於法規標準。

表 4-10 土壤之基線資料

	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S3-1	S3-2	S3-3	S3-4
酸鹼值	7.52	6.80	7.36	7.74	7.26	6.56	7.60	7.71	7.58	7.48	7.60	7.70
總氮(%)	0.013	0.017	0.010	0.008	0.014	0.014	0.011	0.015	0.018	0.008	0.027	0.015
總磷 (mg/kg)	364	409	425	426	400	412	362	399	258	400	426	402
有機磷 (mg/kg)	60.6	99.1	116	64.1	70.8	112	12.3	83.0	2.58	63.9	83.7	83.4
無機磷 (mg/kg)	303	310	309	362	329	300	350	318	263	336	343	319

表 4-11 土壤污染物濃度
(單位：mg/kg)

	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S3-1	S3-2	S3-3	S3-4
TPH _D	2065	738	209	363	4910	831	223	204	144	3954	295	140
Benzene	50.5	10.6	78.1	51.8	817	20.6	82.2	224	10.6	536	40.2	125
Toulene	10.8	2.55	2.68	1.70	386	4.95	6.25	5.45	3.25	273	3.80	2.70
Ethylbenzene	7129	2209	1666	1376	11083	3021	3487	2873	4679	9317	3334	1947
Styrene	101	ND	2.53	ND	1746	1.35	7.08	ND	9.45	1029	8.35	1.13



4.7.2 地下水之基線資料

場址地下水採集 5 點，編號分別為 GW1、GW2、GW3、MW1 及 MW2，每個樣點均進行 2 重複分析，如表 4-12 所示。地下水之基線資料所做之檢測包含點位的井深、水位、溫度、酸鹼值、溶氧(Dissolved Oxygen, DO)、氧化還原電位(Oxidation-Reduction Potential, ORP)、導電度(Electrical Conductivity, EC)、氨氮、硝酸鹽、亞硝酸鹽及磷酸鹽等 11 項測試。

於表 4-12 中得知此 5 個採樣點之地下水水位於地下 2.07—2.33 公尺，而採樣之溫度、酸鹼值及溶氧均差異不大，應為同一區域之水源，故數值較為相近。於氧化還原電位中，檢測之數據為正值即為氧化，反之數據若呈現負值即為還原。觀看試驗場址之監測數據可發現該場地之濃度約為 -2.30—84.4 mV，而 EC 之測值則為 435—909 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

依據台灣之地下水管制標準，地下水中之硝酸鹽及亞硝酸鹽有明確之規定，本污染場址為地下水分類第二類：飲用水水源水質保護區外之地下水。硝酸鹽氮管制標準為 100 mg/L，而亞硝酸鹽氮則為 10.0 mg/L。數據中可發現該地之硝酸鹽濃度並未超出地下水管制標準，而亞硝酸鹽皆超出地下水管制標準，濃度範圍約為 13.7—47.1 mg/L。

於本次地下水採樣中亦針對此污染場址之污染物苯(Benzene)、甲苯(Toulene)、乙苯(Ethylbenzene)及苯乙烯(Stryene)進行污染濃度分析(表 4-13)，同一樣點之分析均採 2 重複進行確認。於數據中可發現乙苯之污染濃度為最高，其次則為苯，再其次為甲苯，其中乙苯污染濃度範圍為 3965—5398 mg/L，但乙苯於水之溶解度約為 170 mg/L，由於地下水所測得之檢測值均超出乙苯之水溶解度，故推測應有純相污染物存在於其中，故造成檢測水中乙苯濃度高於本身之水溶解度。

表 4-12 地下水之基線資料

	水位 (m)	井深 (m)	溫度 (°C)	酸鹼值	DO (mg/L)	ORP (mV)	EC (μS/cm)	氨-氮 (mg/L)	硝酸鹽 (mg/L)	亞硝酸鹽 (mg/L)	磷酸鹽 (mg/L)
GW1	2.074	6.23	31.2	6.97	1.90	8.30	435	12.4	0.26	16.7	3.25
GW2	2.092	5.90	31.2	6.93	2.08	-2.30	560	7.97	2.25	38.0	2.70
GW3	2.332	7.08	30.7	7.12	1.79	84.4	620	10.4	0.35	13.7	2.50
MW1	2.300	7.02	31.5	6.86	1.11	20.6	909	54.3	8.43	47.1	2.60
MW2	2.170	7.09	31.0	7.01	1.08	44.6	677	20.4	4.85	33.4	2.30

表 4-13 地下水污染物濃度
(單位：mg/L)

	GW1-1	GW1-2	GW2-1	GW2-2	GW3-1	GW3-2	MW1-1	MW1-2	MW2-1	MW2-2
Benzene	217	235	198	219	213	266	197	192	243	258
Toulene	16.0	14.0	16.0	11.0	ND	ND	16.0	15.0	13.0	13.0
Ethylbenzene	4890	5398	5269	5055	4595	4336	4984	4805	3965	4121
Styrene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND



4.7.3 污染場址之背景菌相分析

在尚未導入高溶氧水至模場前，先進行地下水與土壤背景菌相分析，於模場設置之 3 口注入井、2 口監測井與 3 點土壤規劃採樣，其位置如圖 4.12 所示。自 3 口注入井(Group A：GW1、GW2、GW3)與 2 口監測井(Group B：MW1、MW2)採集地下水樣品，共獲得 5 個地下水樣品；而同時亦於 3 點土壤採取點(S1、S2、S3)之 4—5 m 與 5—6 m 深度採取土壤樣本，共取樣 6 個土壤樣本。

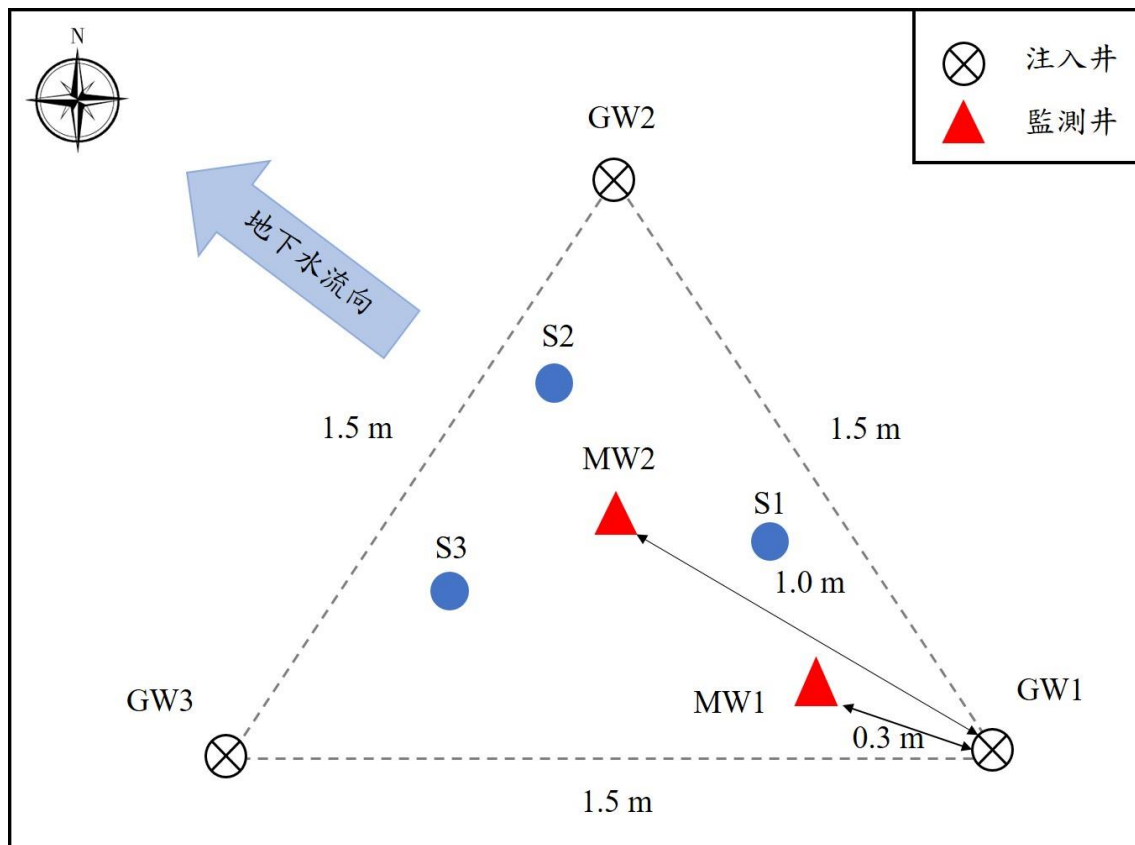


圖 4-12 模場中設置之注入井、監測井與土壤採樣點之位置圖

4.7.3.1 地下水樣本背景菌相分析結果

將 5 個地下水樣本分別過濾、DNA 萃取與次世代定序後，結果發現(表 4-14) 5 個樣本中觀察到細菌物種數介於 211 與 600 種之間，其中以 GW2 所觀察的微生物種類最多，MW1 次之，GW3 最低。而 5 個樣本之菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標是介於 4.94 與 6.74 之間，其中以 GW3 的菌相多樣性最高，MW2 次之，MW1 最低。比較注入井與監測井菌相差異(圖 4-13、圖 4-14)，注入井平均觀察菌種數與組間差異皆高於監測井，且注入井菌相多樣性亦高於監測井。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

表 4-14 模場場址地下水背景樣本所觀察的細菌種類數與 Shannon-Wiener 多樣性指標

Group No.	Sample No.	Observed species	Shannon-Wiener diversity index
A (注入井)	GW1	478	6.21
	GW2	600	6.40
	GW3	211	6.74
B (監測井)	MW1	492	4.94
	MW2	364	6.58

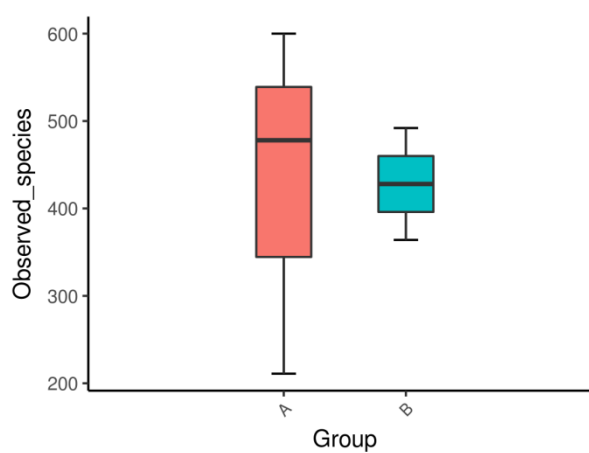


圖 4-13 注入井(A)與監測井(B)的地下水中所觀察物種數之盒鬚圖

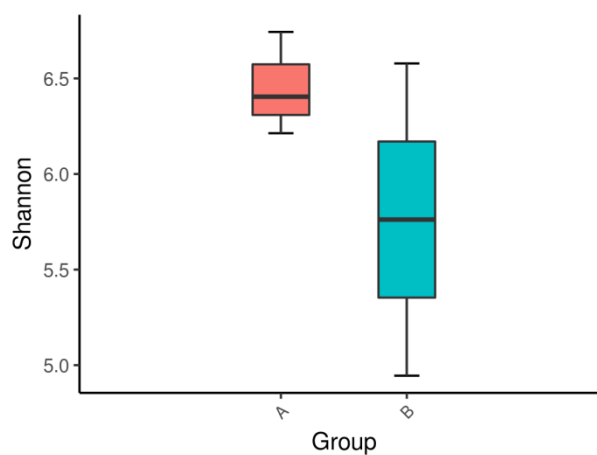


圖 4-14 注入井(A)與監測井(B)的地下水中菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標之盒鬚圖



比較地下水樣本中所觀察到的菌種同異處，3 口注入井(圖 4-15)共觀察到 838 種細菌，3 口井皆存在之菌種有 97 種(佔 12%)，GW1 特有菌種有 158 種(佔 19%)，GW2 特有菌種有 267 種(佔 32%)，其為 3 口井中特有菌種最多者，GW3 特有菌種有 59 種(佔 7%)，是 3 口井中特有菌種最少者；針對兩個樣點間的共同菌種來看，GW1 與 GW2 共同菌種有 299 種(佔兩點總菌種數之 38%)，GW2 與 GW3 共同菌種有 131 種(佔兩點總菌種數之 19%)，GW1 與 GW3 共同菌種有 118 種(佔兩點總菌種數之 21%)。整體而言，3 口注入井地下水中菌種差異性高，GW1 與 GW2 地下水中菌種差異最小，GW2 與 GW3 差異最大，可能因地下水流向是由 GW1 流向 GW2 與 GW3 所致。

在 2 口監測井(圖 4-16)共觀察到 666 種細菌，2 口井皆有的菌種有 190 種(佔 29%)，MW1 特有菌種有 302 種(佔 45%)，MW2 特有菌種有 174 種(佔 26%)，2 口井的菌相略有差異。由於 MW1 位於 GW1 下游 0.3 m，相對距離較近，此 2 井地下水有 32% 菌種(234 種)相同(圖 4-17)，相似度高。

比較 3 口注入井(Group A)與 2 口監測井(Group B)之菌種差異(圖 4-18)，兩組皆有的菌種有 427 種(佔 40%)，注入井特有菌種有 411 種(佔 38%)，監測井特有菌種有 239 種(佔 22%)，可見注入井與監測井之菌種差異不大。

將定序結果與資料庫 Greengene 比對後，可鑑別出之微生物屬於 32 個菌門、73 綱、139 目、196 科、350 屬與 87 種。圖 4-19 列出 5 個地下水樣本所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度，由多到少分別是 Firmicutes、Proteobacteria、Bacteroidetes、Actinobacteria、Spirochaetes、Chloroflexi、Patescibacteria、Thermotogae、Verrucomicrobia 與 Epsilonbacteraeota，其中 GW1 與 MW1 地下水中細菌的最優勢菌門前三名依序為 Proteobacteria、Firmicutes 與 Bacteroidetes，GW1 與 MW1 地下水中細菌的最優勢菌門前三名依序為 Firmicutes、Proteobacteria 與 Bacteroidetes，而 GW3 地下水中細菌的最優勢菌門前三名依序為 Firmicutes、Bacteroidetes 與 Proteobacteria。

圖 4-20 列出 5 口地下水樣本所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度，此前十多的菌屬只佔總菌量的 27—62%，GW1 主要優勢菌屬為 *Ideonella*、*Tepidiphilus* 與 *Caloribacterium*，GW2 主要優勢菌屬為 *Caloribacterium*、*Proteiniphilum* 與 *Moorella*，GW3 主要優勢菌屬為 *Bacteroides*、*Ezakiella* 與 *Prevotella*，MW1 主要優勢菌屬為 *Tepidiphilus*、*Caloribacterium* 與 *Prevotella*，MW2 主要優勢菌屬為 *Tepidiphilus*、*Porphyromonas* 與 *Bacteroides*。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

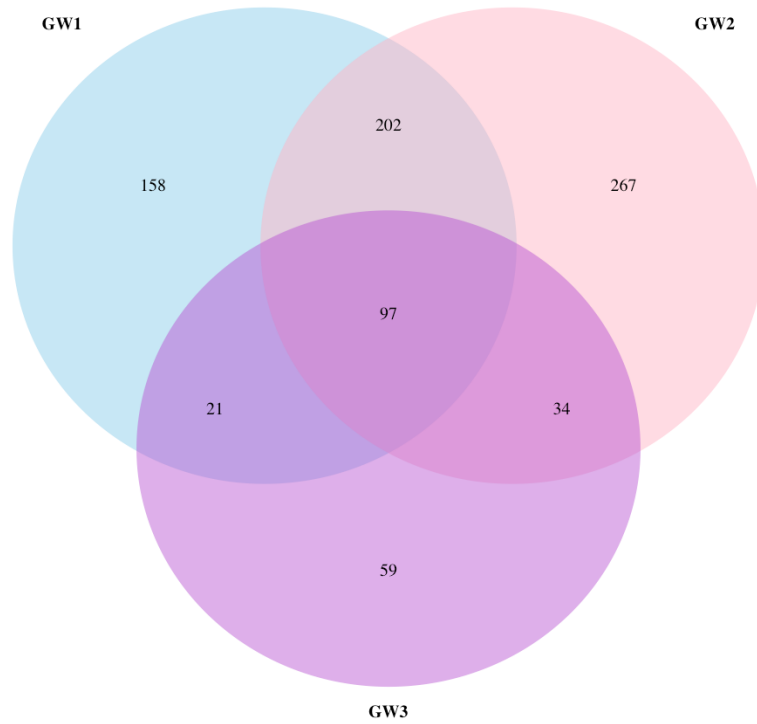


圖 4-15 注入井地下水中菌種同異之文氏圖

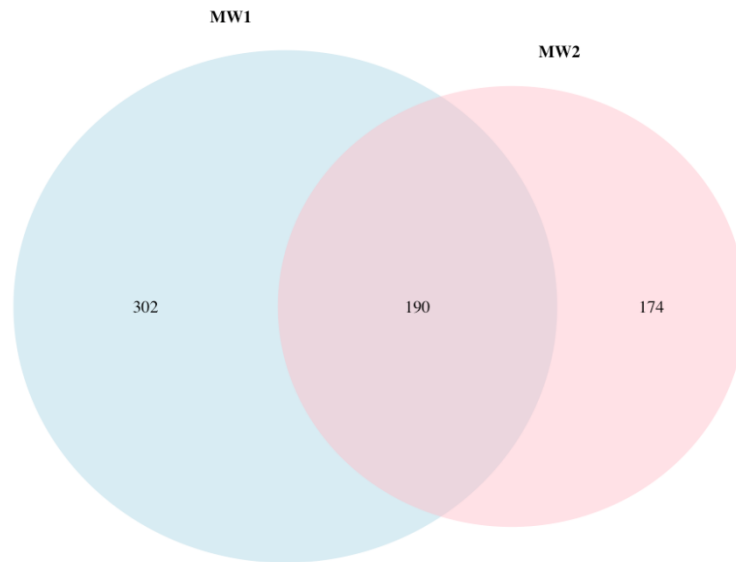


圖 4-16 監測井地下水中菌種同異之文氏圖

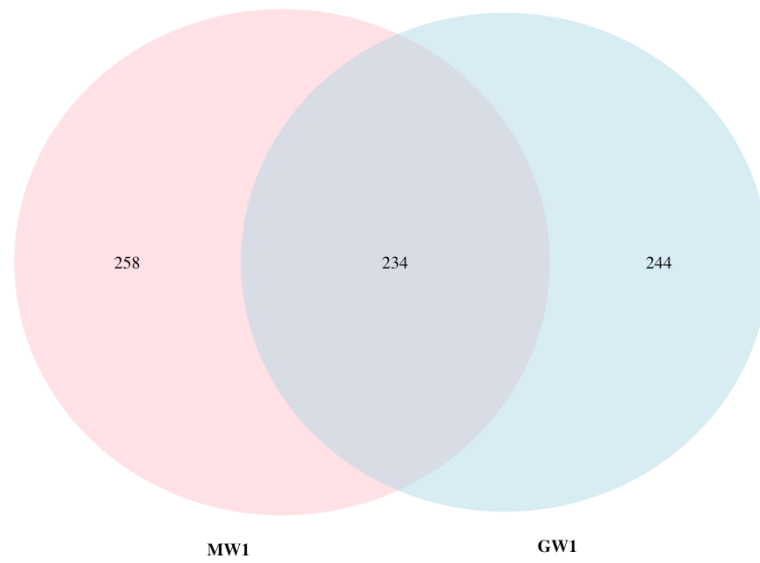


圖 4-17 MW1 與 GW1 井地下水中菌種同異之文氏圖

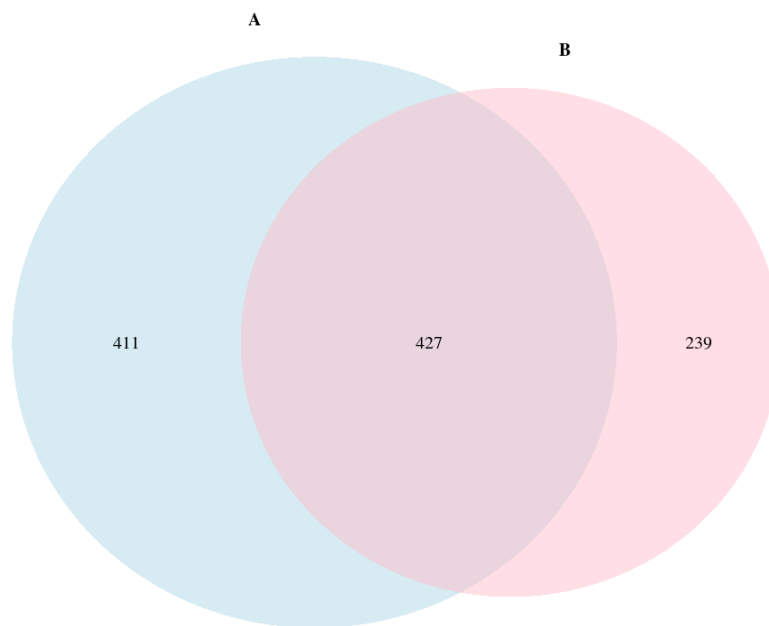


圖 4-18 注入井(A)與監測井(B)地下水中菌種同異之文氏圖



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

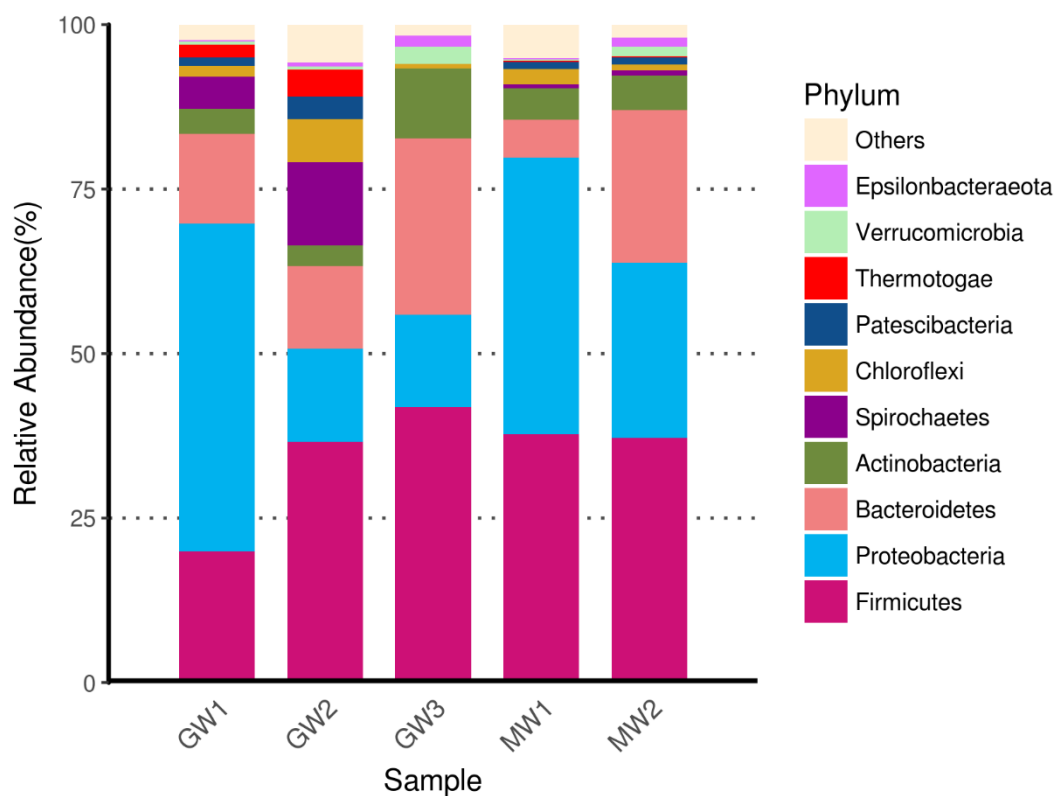


圖 4-19 地下水樣本中所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度

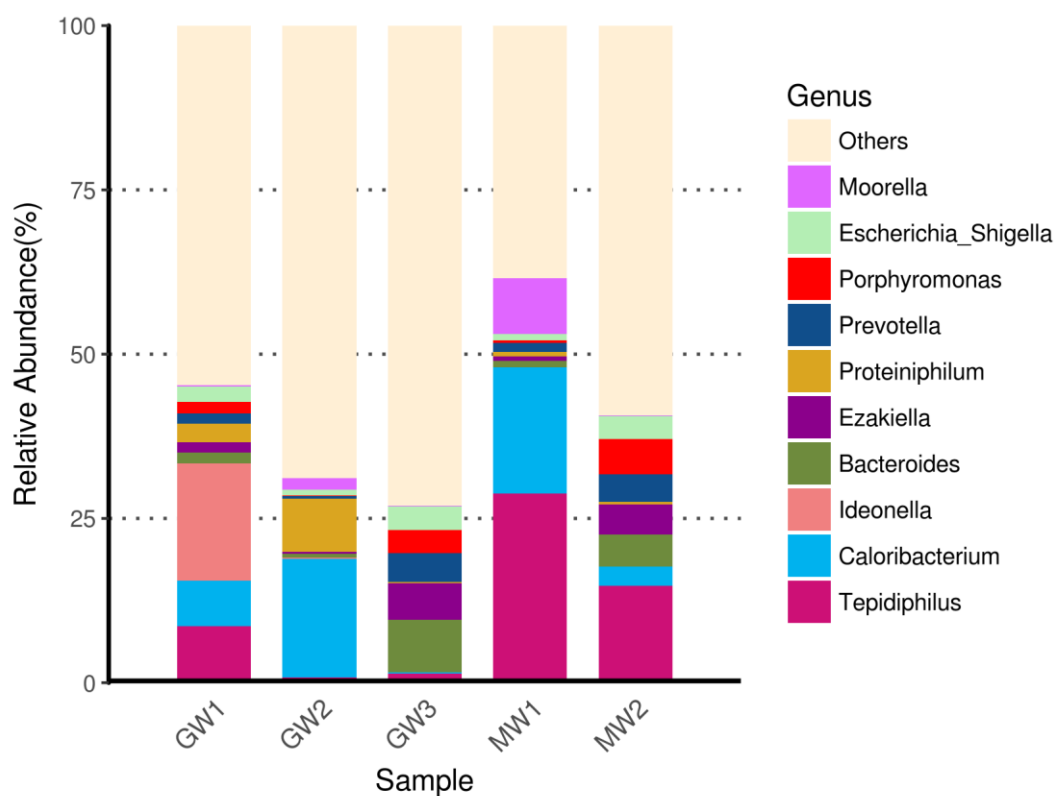


圖 4-20 地下水樣本中所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度



4.7.3.2 土壤背景樣本菌相分析結果

將 6 個土壤樣本分別進行 DNA 萃取與次世代定序後，結果發現(表 4-15) 6 個樣本中觀察到細菌物種數介於 417 至 568 種之間，其中以樣點 S2 深度 4—5 m 的土壤(S2-4.5)中所觀察到的微生物種類最多，樣點 S2 深度 5—6 m 的土壤(S2-5.6)次之，樣點 S1 深度 5—6 m 的土壤(S1-5.6)最低。

表 4-15 模場場址土壤樣本中觀察到的細菌種類數與 Shannon-Wiener 多樣性指標

採樣點	採樣深度	Sample No.	Observed species	Shannon-Wiener diversity index
S1	4—5 m	S1-4.5	426	7.00
	5—6 m	S1-5.6	417	6.98
S2	4—5 m	S2-4.5	568	7.11
	5—6 m	S2-5.6	469	7.11
S3	4—5 m	S3-4.5	442	6.91
	5—6 m	S3-5.6	427	7.00

6 個樣本之菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標是介於 6.91—7.11 之間，其中以樣點 S2 深度 4—5 m 與 5—6 m 的土壤(S2-4.5 與 S2-5.6)之菌相多樣性最高，樣點 S3 深度 4—5 m 的土壤(S3-4.5)最低。比較 3 個採樣點土壤中菌相差異(圖 4-21、圖 4-22)，S2 樣點土壤中平均觀察菌種數與不同深度間差異高於 S1 與 S3 樣點，且 S2 樣點土壤中菌相多樣性亦高於 S1 與 S3 樣點。

比較土壤樣本中所觀察到的菌種同異處，3 個採樣點的土壤中(圖 4-23)共觀察到 721 種細菌，3 個樣點皆有的菌種有 378 種(佔 52%)，S1 特有菌種有 52 種(佔 7%)，是 3 個樣點中特有菌種最少的，S2 特有菌種有 104 種(佔 14%)，是 3 個樣點中特有菌種最多的，S3 特有菌種有 68 種(佔 9%)；針對兩個樣點間的共同菌種來看，S1 與 S2 共同菌種有 430 種(佔兩點總菌種數之 66%)，S2 與 S3 共同菌種有 417 種(佔兩點總菌種數之 62%)，S1 與 S3 共同菌種有 406 種(佔兩點總菌種數之 66%)。整體而言，3 個樣點土壤中菌種差異並不大。

將定序結果與資料庫 Greengene 比對後，可鑑別出之微生物屬於 24 個菌門、44 綱、82 目、115 科、237 屬與 68 種。圖 4-24 列出 6 個土壤樣本所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度，由多到少分別是 Firmicutes、Bacteroidetes、Proteobacteria、Actinobacteria、Epsilonbacteraeota、Fusobacteria、Verrucomicrobia、Tenericutes、Acidobacteria 與 Deinococcus_Thermus，6 個土壤樣本中細菌的最優勢菌門前三名依序皆為 Firmicutes、Bacteroidetes 與 Proteobacteria。圖 4-25



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

列出 6 個土壤樣本所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度，此前十多的菌屬只佔總菌量的 37—40%，樣點 S1、S2 與 S3 在深度 4—5 m (S1-4.5、S2-4.5、S3-4.5)以及樣點 S1 與 S2 深度 5—6m (S1-5.6m、S2-5.6)土壤中主要優勢菌屬為 *Staphylococcus*、*Prevotella* 與 *Escherichia_Shigella*，樣點 S3 深度 5—6m (S3-5.6) 土壤中主要優勢菌屬為 *Prevotella*、*Staphylococcus* 與 *Corynebacterium_1*。

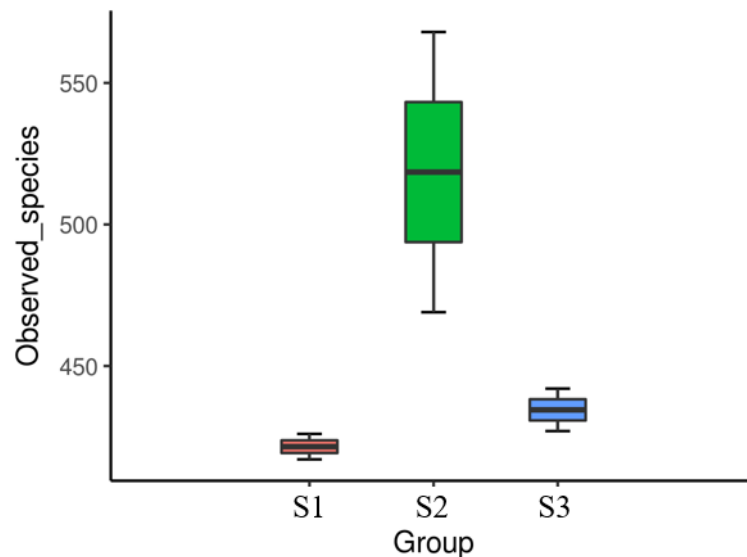


圖 4-21 土壤中所觀察物種數之盒鬚圖

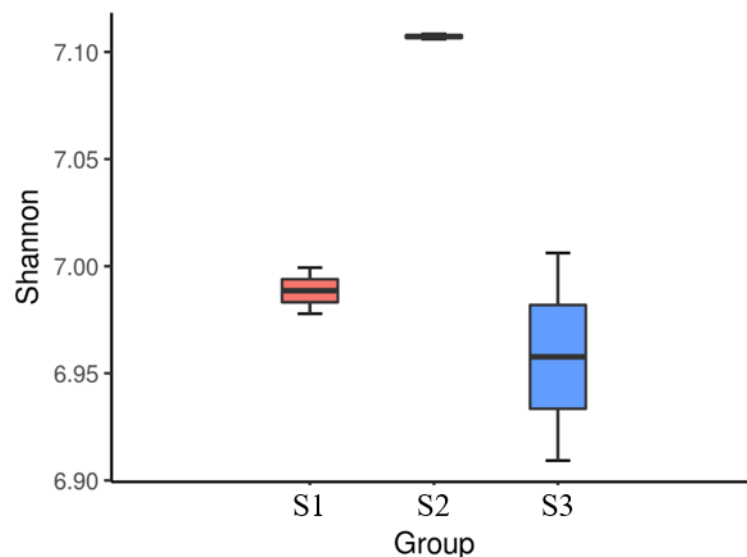


圖 4-22 土壤中菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標之盒鬚圖

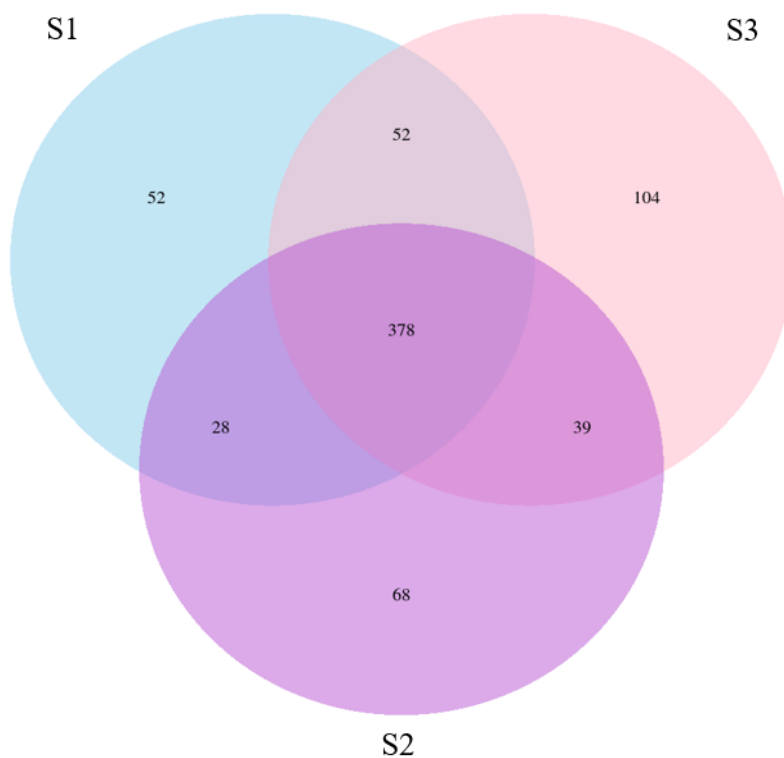


圖 4-23 土壤中菌種同異之文氏圖

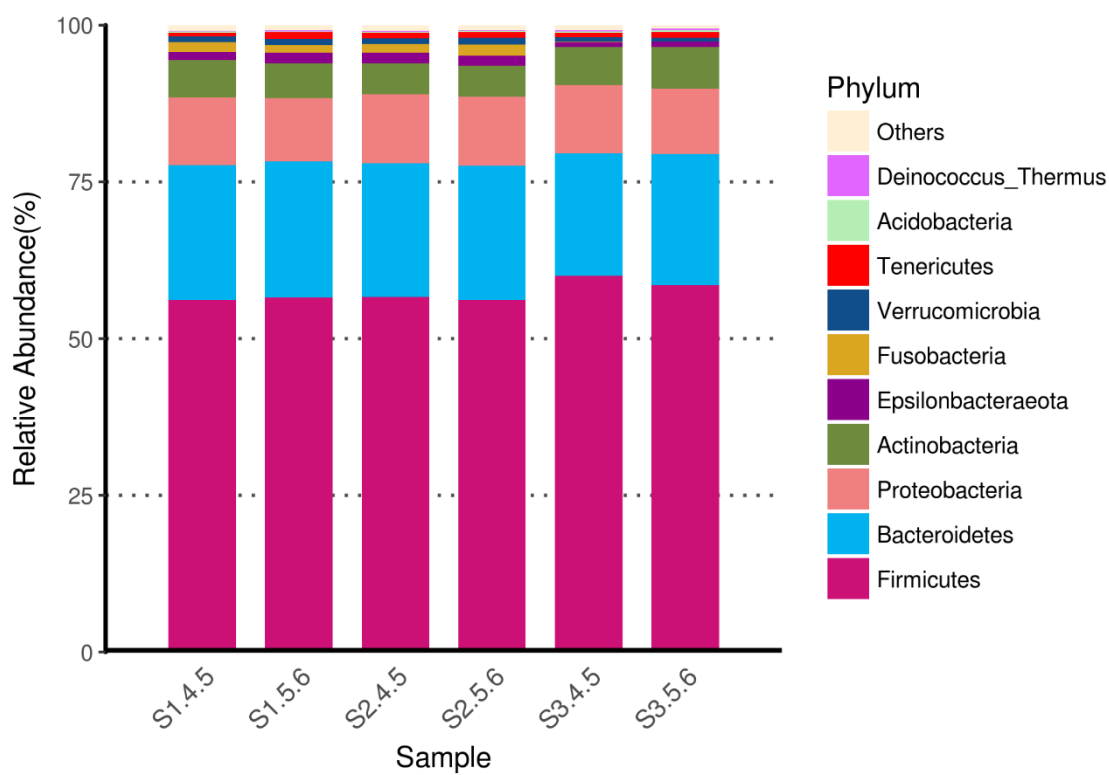


圖 4-24 土壤中所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

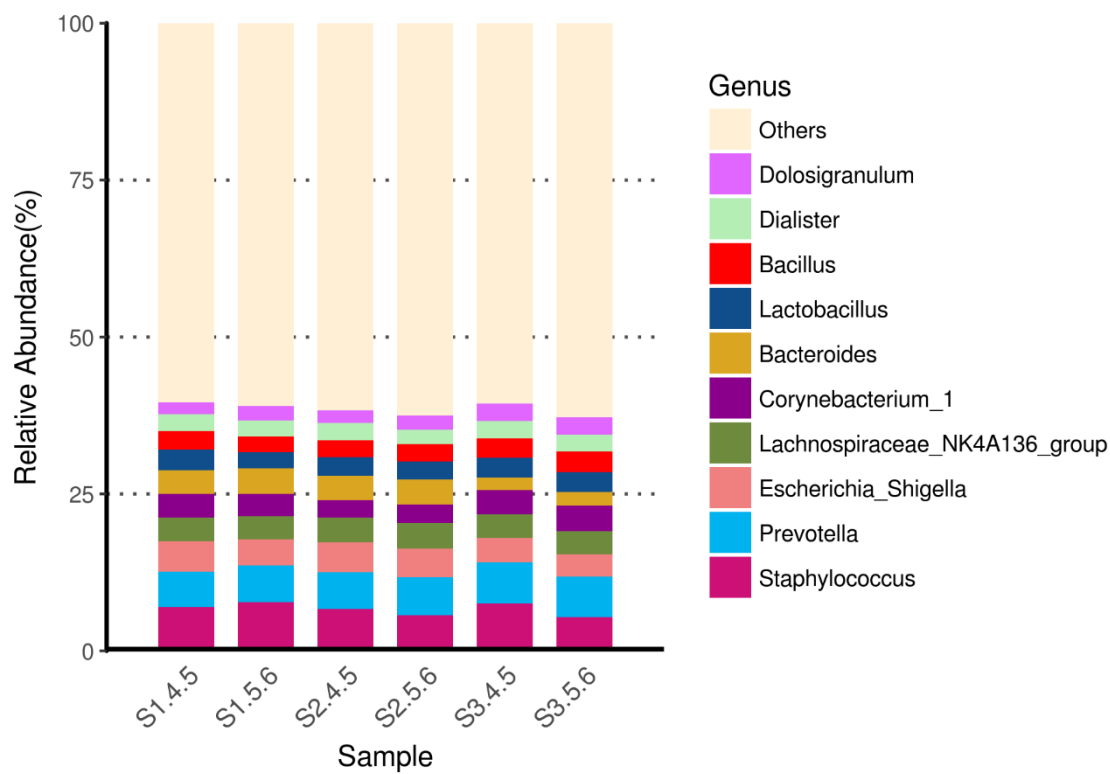


圖 4-25 土壤中所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度



4.8 奈米氣泡水傳輸試驗

本計畫於 2018 年 8 月至 9 月進行井場建立與設備試車，2018 年 10 月 8 日開始進行高溶氧水注入試驗，第一個月為觀察試驗期，每日注水時間為 8 小時，灌注量為每日 2.4 m^3 ；2018 年 11 月 9 日開始調整每日注水時間為 12 小時，灌注量為每日 3.6 m^3 ；2018 年 12 月 12 日開始進行每日注水時間為 24 小時，灌注量為每日 7.2 m^3 ，後因考量持續灌注高溶氧水可能會造成稀釋效應，故於 2019 年 06 月 18 日開始調整每日注水時間為 12 小時，在此期間進行溶氧值監測，觀察其變化。注入之點位則為 GW1、GW2 及 GW3，並監測由高濃度氣體溶解裝置中流出之高溶氧水，監測井為 MW1 及 MW2。

採樣方法如 3.3.5 節所述及，採用環保署最新公告之「監測井地下水採樣方法(NIEA W103.54B)」採集水樣(圖 4-26)，在品保及品管規範下，確保採得之水樣具代表性。監測數據為水樣採集後於現地進行檢測(圖 4-27)，以確保樣品不因保存問題而影響檢測值。



圖 4-26 地下水採樣



圖 4-27 現場監測地下水



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

4.8.1 地下水水質參數監測結果

在模場試驗啟動前之基線資料蒐集所得之數據 MW1 之溶氧為 1.11 mg/L，MW2 之溶氧為 1.08 mg/L，於 2018 年 10 月 8 日起在每日 8 小時注入高溶氧水後，注水端及 MW1、MW2 地下水監測井定期監測結果如圖 4-28 所示，MW1 溶氧濃度測得最高為 9.02 mg/L(詳列於表 4-16)，平均溶氧濃度為 5.91 mg/L，MW2 溶氧濃度測得最高為 2.52 mg/L，平均溶氧濃度為 1.78 mg/L。於 2018 年 11 月 9 日將注水頻率改為每日 12 小時，MW1 溶氧濃度測得最高為 12.1 mg/L，平均濃度為 11.09 mg/L，MW2 溶氧濃度測得最高為 4.06 mg/L，平均濃度為 3.23 mg/L 均較 8 小時注入為高。於 2018 年 12 月 12 日將注水頻率改為每日 24 小時，MW1 溶氧濃度測得最高為 24.3 mg/L，平均溶氧濃度為 14.75 mg/L，MW2 溶氧濃度測得最高為 22.2 mg/L，平均溶氧濃度為 12.9 mg/L。

整體而言，MW2 在採用 8 hr/day、12 hr/day 間歇注入頻率中，溶氧上升幅度較沒有 MW1 幅度顯著，因本場址之地下水流向為東南往西北方向流，故主要影響 MW2 之溶氧變化推測為注水井 GW1，而 MW2 距離注水點 GW1 約 1 公尺，高溶氧水在地下環境中經過傳輸造成一定量的消散，此一結果與 4.4 節中之結果相近，亦為開始注入水之溶氧濃度較高，經由地下環境中之土壤孔隙傳輸後，溶氧濃度可能因撞擊土壤孔隙後消散；而在連續 24 小時注入高溶氧水後，MW2 之溶氧有大幅度的提升，因此持續注入使高溶氧水更擴大溶氧影響半徑且持久不消散，致使溶氧得以提高，但須考量電力及能耗等操作成本，同時為搭配相關整治工法同步施作注入時間可再做調整，此點可做為整場操作之參考。

圖 4-28 為注水端及監測井之溶氧濃度變化圖，2019 年 06 月 18 日開始將每日注水時間調整為 12 小時，改為每日晚上 8 點至隔天早上 8 點注水，而採樣時間在下午時段，由於工廠不允許夜間進行採樣，因此後續沒有檢測注水端溶氧值，而 08 月 22 日至 08 月 30 日因進行油品分解菌添加試驗，考量注水可能影響菌種生長，故停止注水一週。

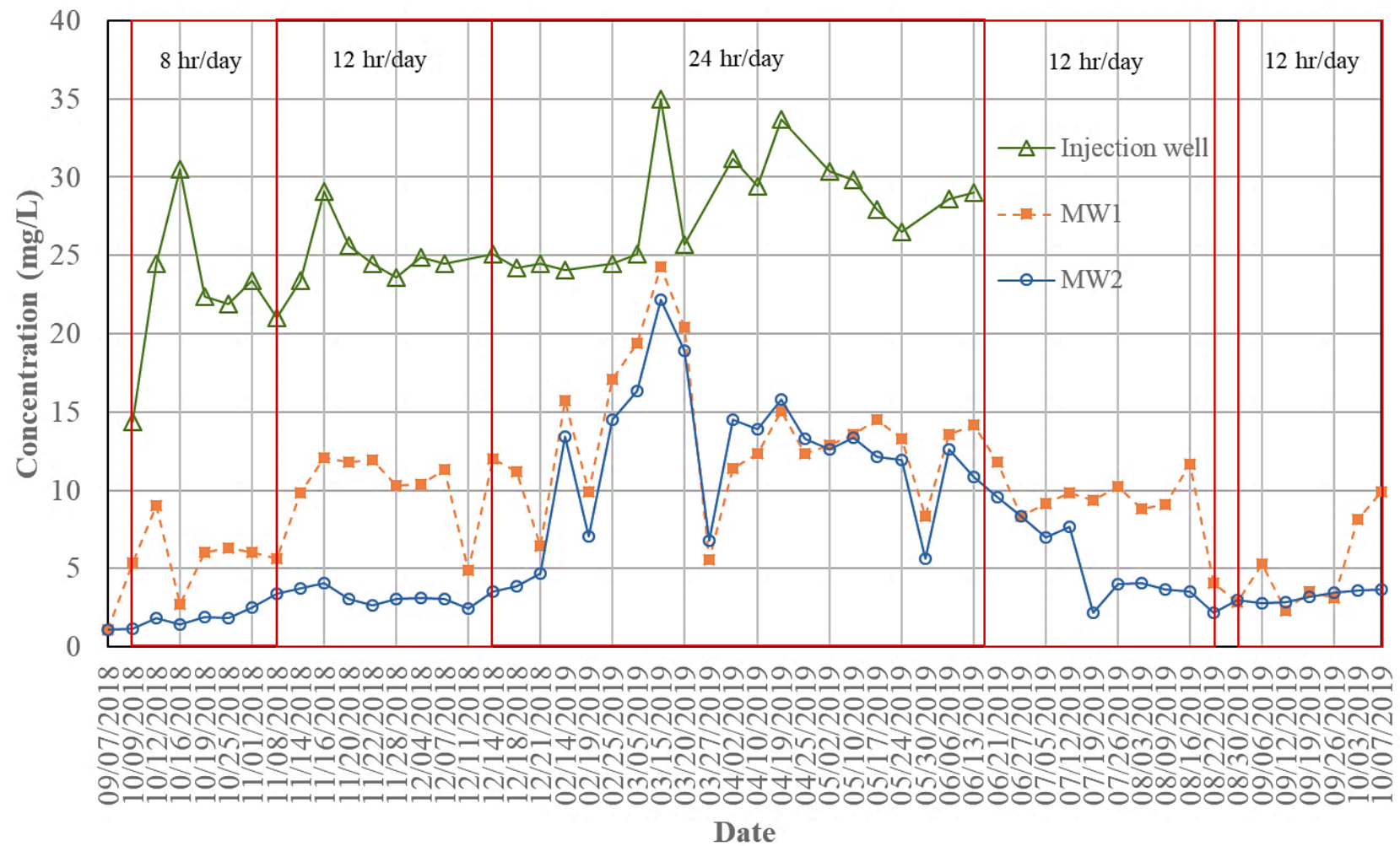


圖 4-28 注水端及監測井溶氧濃度變化



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

表 4-16 注水端及監測井溶氧監測數據

監測日期	注水端	MW1	MW2	監測日期	注水端	MW1	MW2
09/07/2018	NA	1.11	1.08	04/10/2019	29.40	12.35	13.90
10/09/2018	14.40	5.38	1.15	04/19/2019	33.70	15.04	15.81
10/12/2018	24.50	9.02	1.80	04/25/2019	NA	12.31	13.27
10/16/2018	30.50	2.70	1.46	05/02/2019	30.40	12.89	12.59
10/19/2018	22.40	6.02	1.93	05/10/2019	29.80	13.54	13.36
10/25/2018	21.90	6.32	1.83	05/17/2019	27.90	14.54	12.15
11/01/2018	23.40	6.03	2.52	05/24/2019	26.50	13.28	11.95
11/08/2018	21.00	5.60	3.40	05/30/2019	NA	8.34	5.6
11/14/2018	23.40	9.81	3.72	06/06/2019	28.60	13.59	12.62
11/16/2018	29.10	12.10	4.06	06/13/2019	29.00	14.15	10.84
11/20/2018	25.60	11.80	3.04	06/21/2019	NA	11.81	9.58
11/22/2018	24.50	11.93	2.62	06/27/2019	NA	8.33	8.36
11/28/2018	23.60	10.28	3.02	07/05/2019	NA	9.15	6.97
12/04/2018	24.90	10.36	3.12	07/12/2019	NA	9.80	7.63
12/07/2018	24.50	11.32	3.06	07/19/2019	NA	9.36	2.20
12/11/2018	24.50	4.87	2.46	07/26/2019	NA	10.23	3.99
12/14/2018	25.10	12.01	3.56	08/03/2019	NA	8.79	4.10
12/18/2018	24.20	11.20	3.85	08/09/2019	NA	9.10	3.65
12/21/2018	24.50	6.45	4.68	08/16/2019	NA	11.64	3.51
02/14/2019	24.10	15.76	13.42	08/22/2019	NA	4.04	2.15
02/19/2019	24.10	9.87	7.03	08/30/2019	NA	2.83	2.96
02/25/2019	24.50	17.10	14.51	09/06/2019	NA	5.32	2.79
03/05/2019	25.10	19.40	16.36	09/12/2019	NA	2.29	2.86
03/15/2019	35.00	24.30	22.20	09/19/2019	NA	3.56	3.17
03/20/2019	25.70	20.40	18.92	09/26/2019	NA	3.13	3.44
03/27/2019	NA	5.58	6.78	10/03/2019	NA	8.15	3.59
04/02/2019	31.20	11.36	14.52	10/07/2019	NA	9.90	3.66

註：1.單位為 mg/L，2.“NA”為採樣日，故關閉注水系統，無法監測注水端之數據。



4.8.2 地下水採樣分析結果

在土壤及地下水之基線建立後，2018 年 10 月 8 日起開始進行 8 hr/day 的高溶氧水注入，在一個月後執行地下水採樣，分析項目為氨氮、硝酸鹽、亞硝酸鹽、磷酸鹽、苯、甲苯、乙苯、苯乙烯，採樣後分析結果列於表 4-17，氨氮自基線建立時濃度介於 7.97—54.3mg/L，經過一個月注水後下降至 0.04—0.38 mg/L，亞硝酸鹽濃度從 13.7—47.1 mg/L 降至 Not Detected (ND)，而最高為 0.23 mg/L，硝酸鹽則從 0.26—8.43 mg/L 上升至 7.75—43.86 mg/L，硝酸鹽及亞硝酸鹽皆低於地下水管制標準，推估為微生物代謝過程中所致。

有機污染物苯的濃度在經過一個月的注水後也從原本基線調查之 198—266 mg/L 降至 ND—60.0 mg/L，而在基線建立中超過地下水管制標準之乙苯，也從最高 5269 mg/L 降至 ND—1916 mg/L 濃度範圍，而甲苯、苯乙烯在本次採樣中均未檢出，苯及乙苯仍超過地下水管制標準，在本次分析中，乙苯分析數據仍高其於水中之溶解度，推估地下水中仍有純相存在，測值大幅度下降，推估為高溶氧水灌注之稀釋作用及微生物之降解作用所致。

表 4-17 地下水採樣分析結果(11/08/2018)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.21	0.10	0.04	0.21	0.38
硝酸鹽	mg/L	28.13	7.75	43.86	43.19	44.74
亞硝酸鹽	mg/L	ND	ND	0.23	0.03	ND
磷酸鹽	mg/L	3.75	5.35	3.75	2.58	3.70
苯	mg/L	ND	ND	ND	8.0	60.0
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND
乙苯	mg/L	67.0	ND	ND	1916	470
苯乙烯	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND

2018 年 11 月 9 日起實施 12 hr/day 的高溶氧水注入，一個月後地下水定期監測分析數據列於表 4-18，氨氮濃度為 0.06—0.24 mg/L，硝酸鹽濃度為 3.99—65.56 mg/L，亞硝酸鹽濃度為 ND—0.07 mg/L，磷酸鹽濃度為 2.9—4.6 mg/L。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

在 2018 年 12 月 11 日採樣分析結果中，MW1、MW2 之苯濃度也較 2018 年 11 月 8 日低，而 GW3 則測得 0.9 mg/L，MW1 亦測得微量甲苯，乙苯濃度呈現下降趨勢(從 1916 mg/L 降至 694 mg/L)，但 MW2 變化較大，呈現回升情況較為明顯(從 470 mg/L 增至 801 mg/L)，GW2 亦存在高濃度乙苯，由於各井均測得乙苯，推估模場區域仍有高濃度純相污染物存在，由於灌注使地下水位、地下水流向產生變化而污染物釋出至溶解相所致。

表 4-18 地下水採樣分析結果(12/11/2018)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.23	0.08	0.06	0.12	0.24
硝酸鹽	mg/L	3.99	4.43	7.97	65.56	23.04
亞硝酸鹽	mg/L	ND	ND	ND	0.07	ND
磷酸鹽	mg/L	3.8	3.2	2.9	4.6	4.5
苯	mg/L	ND	ND	0.9	4.1	3.3
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	0.8	ND
乙苯	mg/L	5.7	2212	112	694	801
苯乙烯	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND

在執行連續 24 hr/day 注入高溶氧水至 2019 年 06 月 18 日，採樣分析數據如表 4-19 至表 4-22，在這四次採樣分析結果中，氨氮濃度依採樣日期遠至近分別為 0.07—0.32 mg/L、0.10—0.85 mg/L、0.12—0.99 mg/L、0.20—0.82 mg/L，硝酸鹽濃度分別為 4.87—9.30 mg/L、9.30—21.71 mg/L、8.42—90.40 mg/L、9.30—46.07 mg/L，亞硝酸鹽濃度分別為 2.6—4.2 mg/L、ND—0.03 mg/L、ND—0.12 mg/L、ND—0.55 mg/L，磷酸鹽濃度分別為 2.6—4.2 mg/L、3.0—6.2 mg/L、2.3—3.7 mg/L、1.6—3.2 mg/L。

由這四次採樣分析結果中得知，五口井之苯濃度為 0.1—9.0 mg/L，較去年 11 月為低，但仍存在，甲苯則較高於 2018 年 12 月 11 日之採樣結果，濃度為 0.15—36.5 mg/L，乙苯在五口井普遍測得且在 MW1 出現高濃度，且濃度變化大，濃度為 ND—2151 mg/L，而苯乙烯在前兩次的採樣中皆未檢出(表 4-17、表 4-18)，卻在後續幾次採樣中檢出(表 4-21 至表 4-24)，在 MW1 出現高濃度最高達 770.6 mg/L，推估由於灌注使地下水水位、地下水流向產生變化，而將原本孔隙介質中吸附態之污染物溶出而被檢出。



表 4-19 地下水採樣分析結果(02/19/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.29	0.21	0.15	0.32	0.07
硝酸鹽	mg/L	9.30	8.86	7.53	4.87	8.42
亞硝酸鹽	mg/L	0.07	ND	ND	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	3.0	3.5	4.2	2.6	3.9
苯	mg/L	ND	ND	ND	4.0	9.0
甲苯	mg/L	ND	4.35	ND	36.5	19.0
乙苯	mg/L	16.00	7.60	13.80	1333	2151
苯乙烯	mg/L	ND	ND	ND	24.0	ND

表 4-20 地下水採樣分析結果(03/27/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.20	0.63	0.85	0.10	0.77
硝酸鹽	mg/L	21.71	15.95	9.30	11.52	21.71
亞硝酸鹽	mg/L	0.03	ND	ND	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	3.0	5.4	6.2	6.0	3.3
苯	mg/L	ND	ND	ND	1.6	0.1
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	0.15	ND
乙苯	mg/L	1.85	ND	16.95	491.9	266.05
苯乙烯	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND

表 4-21 地下水採樣分析結果(04/25/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.99	0.77	0.18	0.12	0.22
硝酸鹽	mg/L	16.80	90.40	42.10	8.42	38.50
亞硝酸鹽	mg/L	ND	0.09	0.12	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	2.3	2.9	3.5	2.9	3.7
苯	mg/L	ND	ND	ND	4.8	ND
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	1.8	ND
乙苯	mg/L	0.95	ND	14.88	1107	0.95
苯乙烯	mg/L	0.8	ND	10.5	770.6	0.8



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

表 4-22 地下水採樣分析結果(05/30/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.20	0.22	0.37	0.26	0.82
硝酸鹽	mg/L	9.30	11.50	14.60	18.16	46.10
亞硝酸鹽	mg/L	0.03	0.55	0.43	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	2.60	2.80	2.90	1.60	3.20
苯	mg/L	ND	1.4	ND	1.45	0.60
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	ND	0.45
乙苯	mg/L	ND	ND	12.25	342.0	562.6
苯乙烯	mg/L	ND	ND	8.50	228.15	375.6

觀察 MW1 及 MW2 這兩口監測井之污染物濃度較其他三口注入井高，整體而言目標污染物多出現在 MW1 及 MW2 這兩口監測井，其中以乙苯在 MW1 及 MW2 普遍出現高濃度，推估因三口注水井有高溶氧水灌注使污染物產生稀釋作用所致，因此 2019 年 6 月 27 日起在採樣前 2 日皆會關閉高溶氧注水系統。

2019 年 06 月 18 日起將注水頻率調整為 12 hr/day，並在採樣前 2 日停止注水，採樣分析數據如表 4-23 至表 4-25，在三次採樣分析結果中，氨氮濃度依採樣日期遠至近分別為 ND—1.28 mg/L、ND—0.09 mg/L、0.03—0.3 mg/L，硝酸鹽濃度分別為 8.4—19.9 mg/L、3.5—13.3 mg/L、3.54—11.5 mg/L，亞硝酸鹽則大多未檢出，磷酸鹽濃度分別為 1.2—3.9 mg/L、0.3—0.9 mg/L、0.7—1.9 mg/L。

這三次採樣分析結果中，苯最高於 MW2 中測得 33.0 mg/L，甲苯最高亦於 MW2 中測得 2.13 mg/L，乙苯最高亦於 MW2 中測得 1665 mg/L，與連續 24 小時注水時之檢測結果比較發現普遍有增加的趨勢。

在 2019 年 08 月 22 日採樣後，即於 GW1 緩慢投入油品分解菌培養液，投菌一週後(2019 年 08 月 30 日)再進行採樣。比較投菌前後之分析結果(表 4-25 及表 4-26)發現硝酸鹽濃度的上升較為顯著，而污染物的濃度除了 MW2 外，其餘四口井皆提高，推估可能因該週雨量較大，造成地下水水位產生變化，造成部分吸附於孔隙介質污染物脫附及溶解而被檢出。



表 4-23 地下水採樣分析結果(06/27/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.17	ND	0.15	1.28	0.12
硝酸鹽	mg/L	8.4	8.9	9.7	9.75	19.9
亞硝酸鹽	mg/L	0.03	0.03	0.06	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	1.90	3.90	1.90	1.20	3.90
苯	mg/L	ND	ND	ND	2.80	1.10
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	0.70	ND
乙苯	mg/L	ND	ND	7.70	876	256
苯乙烯	mg/L	ND	0.30	5.00	585	171

表 4-24 地下水採樣分析結果(07/19/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	ND	0.02	0.02	0.06	0.09
硝酸鹽	mg/L	13.3	11.1	3.5	9.30	4.0
亞硝酸鹽	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	0.90	0.50	0.70	0.30	0.90
苯	mg/L	ND	ND	ND	7.90	33.0
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	1.30	0.75
乙苯	mg/L	ND	ND	ND	949	910
苯乙烯	mg/L	ND	ND	ND	683	622

表 4-25 地下水採樣分析結果(08/22/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.03	0.07	0.04	0.30	0.16
硝酸鹽	mg/L	6.65	11.5	7.97	4.43	3.54
亞硝酸鹽	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	1.90	1.10	1.20	1.00	0.70
苯	mg/L	ND	ND	ND	8.63	31.4
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	1.13	2.13
乙苯	mg/L	ND	ND	ND	1131	1665
苯乙烯	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

表 4-26 地下水採樣分析結果(08/30/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.57	0.15	0.16	0.56	0.21
硝酸鹽	mg/L	29.2	9.30	9.30	65.6	74.9
亞硝酸鹽	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	5.40	1.10	1.10	1.50	1.60
苯	mg/L	9.375	1.875	1.625	23.63	11.13
甲苯	mg/L	1.875	ND	ND	2.500	1.375
乙苯	mg/L	479.9	293.0	46.38	1587	1325
苯乙烯	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND

2019 年 09 月 26 日為本計畫最後一次地下水採樣，分析結果列於表 4-27，苯與乙苯之濃度雖仍高於管制標準，但與最初背景值比較(表 4-13)，濃度均已大幅降低。

表 4-27 地下水採樣分析結果(09/26/2019)

分析項目	單位	GW1	GW2	GW3	MW1	MW2
氨氮	mg/L	0.11	0.14	0.86	0.16	0.29
硝酸鹽	mg/L	9.7	22.59	4.43	13.7	19.5
亞硝酸鹽	mg/L	ND	0.06	ND	ND	ND
磷酸鹽	mg/L	2.20	0.30	0.50	0.70	0.70
苯	mg/L	ND	ND	ND	12.1	15.1
甲苯	mg/L	ND	ND	ND	1.15	1.40
乙苯	mg/L	1.25	9.50	3.10	348	639
苯乙烯	mg/L	ND	ND	ND	0.30	ND



4.8.3 土壤採樣分析結果

經一年之高溶氧水灌注後，於 2019 年 10 月 01 日進行土壤採樣，採樣點位與蒐集基線資料時相同(圖 4-9)，分別為 S1、S2 及 S3，採樣深度為 4—6 米，且每 50 公分收取一段土壤，每個採樣點共有 4 段土壤，編號分別為 S1-1、S1-2、S1-3、S1-4、S2-1、S2-2、S2-3、S2-4、S3-1、S3-2、S3-3 及 S3-4，共 12 的點位，分析時進行 2 重複，結果列於表 4-28、表 4-29。

酸鹼值為影響微生物生長於地下環境中的重要因素之一，由實驗數據中得知目前場址之土壤酸鹼度約為 7.12—7.90 之間，平均為 7.54，與灌注前差不多。

氮為微生物生長之必要元素之一，土壤中之氮含量通常介於 0.02—2.5%之間。而經一年灌注後所測得之範圍約為 ND—0.013%之間，平均為 0.011%，此氮含量略低於一般土壤之含氮量。

磷元素在土壤中之濃度約為 600 mg/kg，經一年灌注後所測得之總磷濃度範圍約為 673—847 mg/kg，平均為 776 mg/kg，目前磷含量略高於一般土壤之含磷之平均濃度，與基線資料比較(表 4-10)增加約一倍之多。

此次分析結果(表 4-29)與基線資料(表 4-11)比較可知，經這一年的灌注後，土壤之污染物濃度均有顯著降低的情形，苯及乙苯目前雖仍有些許高於管制標準，但大多已符合法規規定，證實本計畫所提出的方法能有效降低污染物濃度。



圖 4-29 土壤採樣



圖 4-30 所採集之土壤樣本

表 4-28 土壤之檢測結果

	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S3-1	S3-2	S3-3	S3-4
酸鹼值	7.62	7.43	7.54	7.55	7.61	7.44	7.86	7.90	7.72	7.52	7.12	7.22
總氮(%)	0.008	0.006	0.007	0.008	0.010	0.013	0.011	0.008	0.010	ND	0.004	0.006
總磷 (mg/kg)	834	773	811	816	673	795	847	824	691	715	759	770
有機磷 (mg/kg)	299	235	172	154	123	147	156	172	238	147	200	226
無機磷 (mg/kg)	535	539	640	662	550	648	691	652	453	569	559	544

表 4-29 土壤中目標污染物濃度
(單位：mg/kg)

	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S3-1	S3-2	S3-3	S3-4
TPH _D	668	362	72.2	112	ND	204	104	125	1417	130	131	29.7
Benzene	4.50	0.79	15.64	1.62	0.16	0.59	10.7	11.8	4.33	0.13	10.0	14.3
Toulene	0.87	0.94	0.61	0.11	0.04	15.3	1.04	1.31	1.16	ND	1.34	1.29
Ethylbenzene	188	499	119	50.7	23.1	567	241	188	239	40.3	273	277
Styrene	ND	0.36	ND	ND	ND	0.82	ND	ND	ND	ND	0.06	ND



4.8.4 菌相分析結果

地下水樣本除了檢測營養鹽及污染物以外，另外進行菌相分析，以利瞭解經高溶氧水灌注後，地下環境改變對於微生物族群消長的影響。

4.8.4.1 不同時間採集的監測井地下水之菌相分析

在導入高溶氧水至模場後，於 2019 年 3 月、6 月、7 月與 8 月採取 2 個監測井地下水 (MW1 與 MW2) 進行菌相分析，以了解在導入高溶氧水後，地下水菌相改變狀況。然而因 7 月份地下水樣本萃取之 DNA 濃度偏低，為了確保能定序，於是送樣兩次進行菌相分析，所以 7 月份兩個監測井各皆有兩個重複樣本分析數據呈現。

如表 4-30 所示，10 個樣本中所觀察的細菌物種數介於 404—1036 種之間，以監測井 MW1 於 7 月與 8 月採集的地下水中細菌物種數最高，監測井 MW2 於 3 月採集的地下水中細菌物種數最低，MW1 之細菌物種數介於 494 至 1036 種之間，MW2 之細菌物種數介於 404 至 786 種之間，不管是哪一監測井所採集之地下水中，細菌物種數皆隨著持續加入高溶氧水後逐漸增加，特別是 MW1 監測井，其地下水中細菌物種數增加速度與數量皆高於 MW2 監測井，可能是 MW1 監測井較靠近於注入井 GW1 (相距 0.3 m) 而能獲得較多之氧氣所致；而於 7 月與 8 月時兩個監測井地下水細菌物種數似乎已達穩定狀態。

表 4-30 不同時間採集的監測井地下水中觀察到的細菌種類數與 Shannon-Wiener 多樣性指標

採樣月份	Sample No.	Observed species	Shannon-Wiener diversity index
2019 年 3 月	MW110803	494	4.43
	MW210803	404	3.26
2019 年 6 月	MW110806	974	6.90
	MW210806	728	5.02
2019 年 7 月	MW110807	1036	5.74
	MW210807	609	4.39
	MW1108R7	982	5.45
	MW2108R7	581	4.21
2019 年 8 月	MW110808	1036	5.91
	MW210808	786	6.01



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

10 個樣本之菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標介於 3.26—6.90 之間，其中以 MW1 於 6 月採集地下水中的菌相多樣性最高，MW2 於 3 月採集地下水中的菌相多樣性最低。MW1 監測井地下水中菌相多樣性高於 MW2 監測井，兩個監測井地下水菌相多樣性趨勢皆是從 3 月到 6 月隨時間增加而增加，而 7 月份略為下降後於 8 月份增加，可見在持續加入高溶氧水後增加地下水中的溶氧是會增加其菌相多樣性。比較兩個監測井菌相差異(如圖 4-31 與 4-32)，MW1 觀察菌種數與菌相多樣性皆高於 MW2，但其不同月份差異是 MW2 高於 MW1。

將菌相之 Shannon-Wiener 多樣性指標與水質參數進行相關性分析，結果顯示微生物菌相與水質參數並無直接關係。

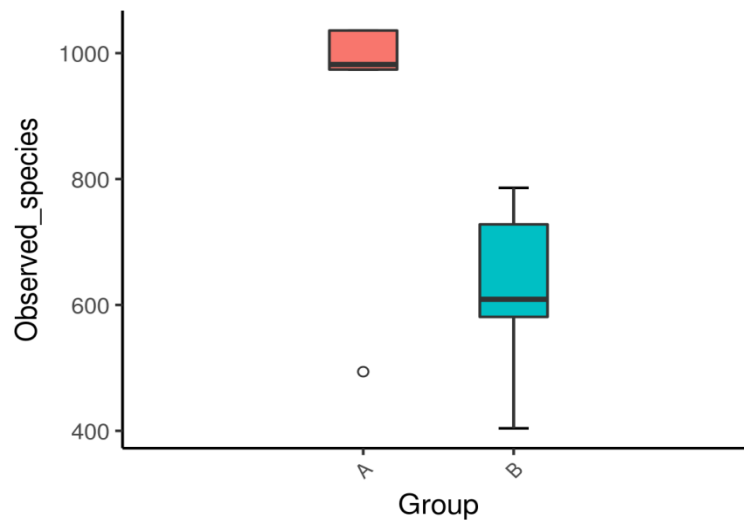


圖 4-31 兩個監測井地下水中所觀察細菌物種數之盒鬚圖

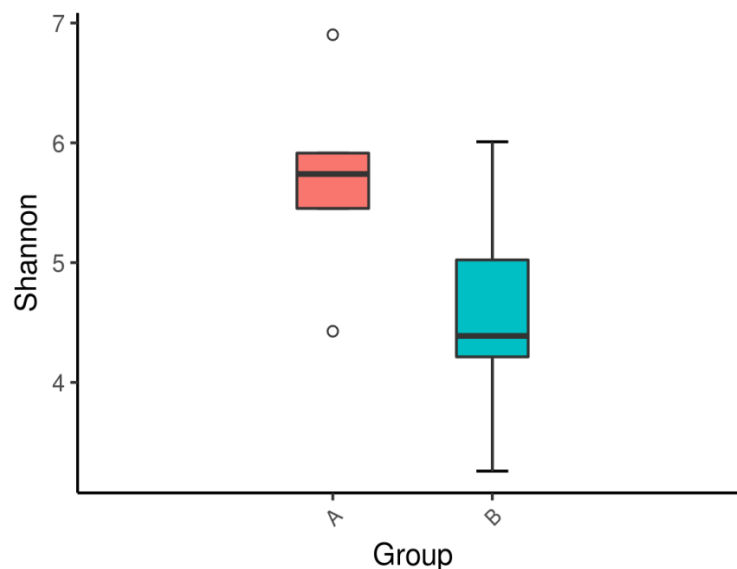


圖 4-32 兩個監測井地下水中菌相 Shannon-Wiener 多樣性指標之盒鬚圖



比較地下水樣本中所觀察到的菌種同異處，在 2 個監測井於 3 月份採集的地下水中(圖 4-33)共觀察到 623 種細菌，2 個井皆有的菌種有 275 種(佔 44%)，MW1 特有菌種有 219 種(佔 35%)，MW2 特有菌種有 129 種(佔 21%)。

而於 6 月份採集的地下水中(圖 4-34)共觀察到 1086 種細菌，2 個井皆有的菌種有 616 種(佔 57%)，MW1 特有菌種有 358 種(佔 33%)，MW2 特有菌種有 112 種(佔 10%)。7 月份採集的地下水中(圖 4-35)共觀察到 1144 種細菌，2 個井皆有的菌種有 501 種(佔 44%)，MW1 特有菌種有 535 種(佔 47%)，MW2 特有菌種有 108 種(佔 9%)。於 8 月份採集的地下水中(圖 4-36)共觀察到 1171 種細菌，2 個井皆有的菌種有 651 種(佔 56%)，MW1 特有菌種有 385 種(佔 33%)，MW2 特有菌種有 135 種(佔 12%)。

不管是哪一月份，兩個監測井中所採集地下水共同菌種佔 44—57%，而整體而言(圖 4-37)，MW1 與 MW2 共同菌種數為 1028 種(佔 73%)，MW1 特有菌種有 309 種(佔 22%)，MW2 特有菌種有 67 種(佔 5%)，可見兩個監測井菌種差異不大，但 MW1 特有菌種數高於 MW2，這可能與其較靠近注入井 GW1 有關。

而且兩個監測井所觀測之總菌種數從 3 月份的 623 種隨著時間增加到 8 月份的 1171 種，由此結果得知持續打入高溶氧水到地下水層中可促進微生物生長，進而使得地下水中菌種數增加。與未打入高溶氧水前兩個監測井菌相差異度進行比對，發現尚未灌注高溶氧水前，兩個監測井菌相差異度大(圖 4-16)，共同菌種只佔 29%，然而加入高溶氧水後(圖 4-33 至 4-37)，其共同菌種增加至 73%，可見加入高溶氧水可能促進同一類型菌種大量生長，而使得兩個監測井地下水中菌相差異度減小。

不同樣本間的相似性可透過對樣本進行聚類分析建構聚類樹加以了解，在環境生物學中，UPGMA (Unweighted Paired-Group Method Using Arithmetic Means)是一種較為常用的聚類分析方法，以 Weighted Unifrac 距離矩陣做 UPGMA 聚類分析(圖 4-38)，兩個監測井 3 月份之菌相最相似，MW1 監測井 7 月與 8 月樣本之菌相較為相似，MW2 監測井 7 月與 8 月樣本之菌相較為相似，顯示各個監測井地下水到 7 月與 8 月份時菌相已趨近穩定。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

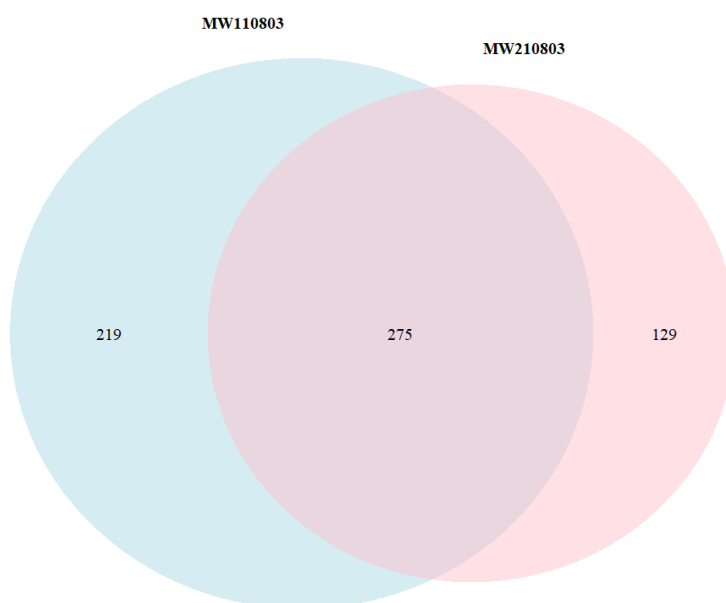


圖 4-33 3 月份採集 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖

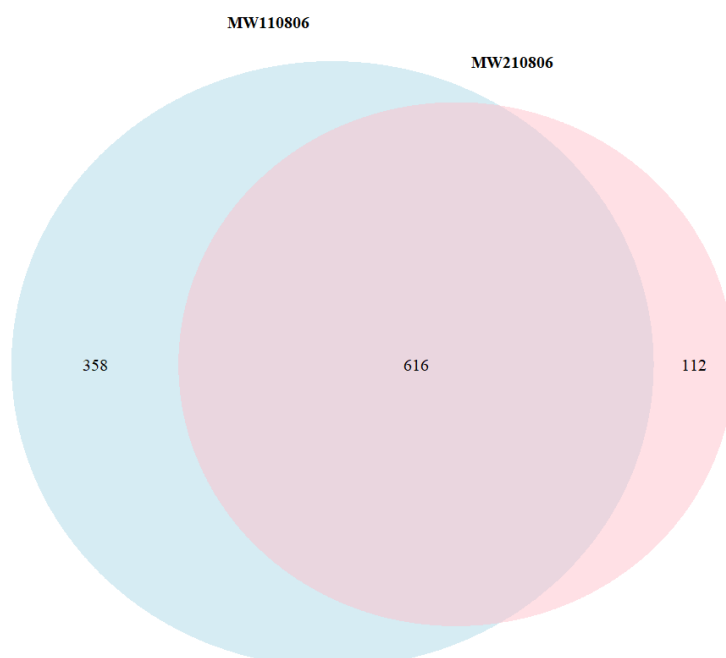


圖 4-34 6 月份採集 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖

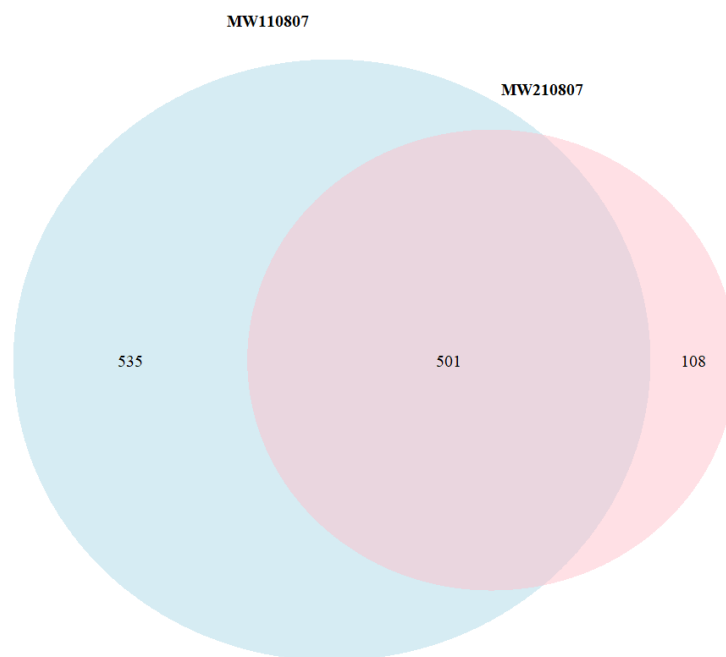


圖 4-35 7 月份採集 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖

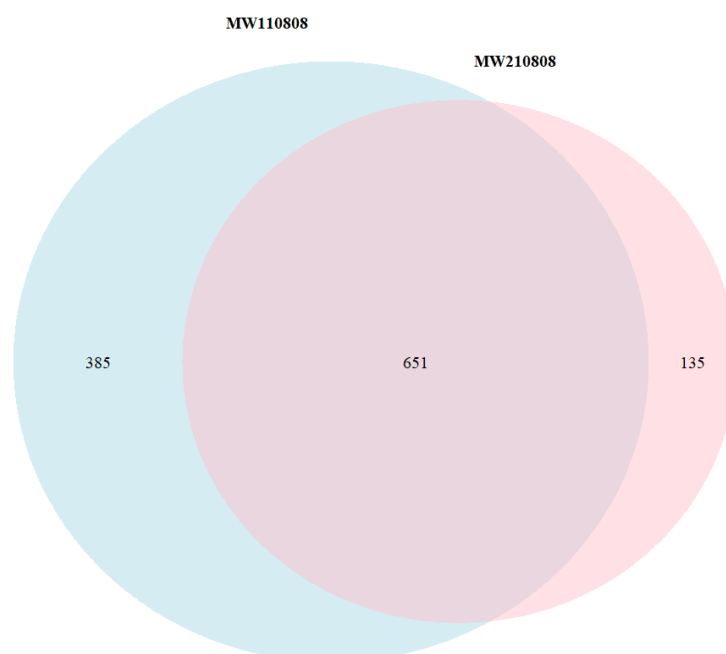


圖 4-36 8 月份採集 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

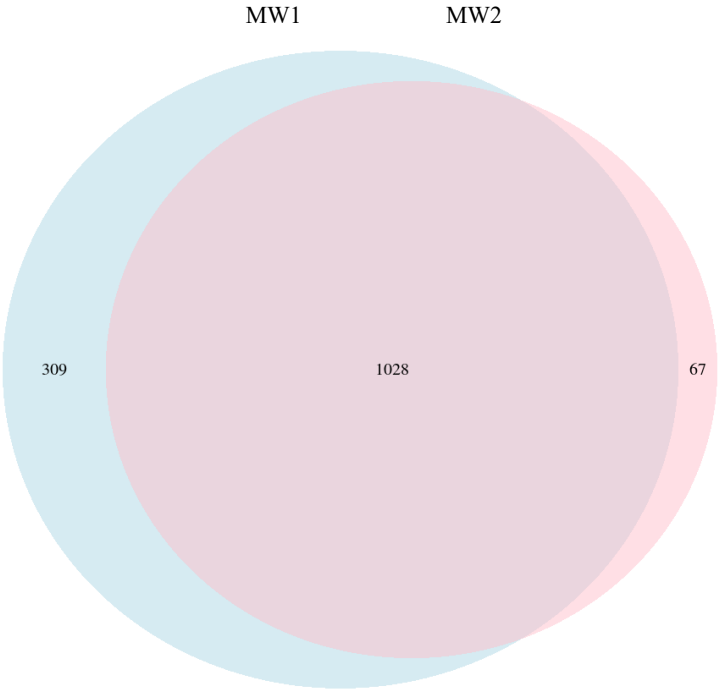


圖 4-37 2 個監測井地下水中菌種同異之文氏圖

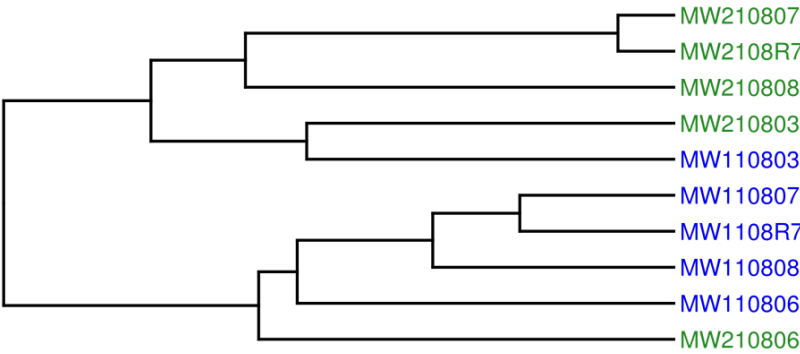


圖 4-38 UPGMA 聚類樹



在 10 個地下水樣本中，可鑑別出之微生物屬於 34 個菌門、77 綱、149 目、207 科、291 屬與 77 種。圖 4-39 列出所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度，由多到少分別是 Proteobacteria、Bacteroidetes、Patescibacteria、Firmicutes、Actinobacteria、Planctomycetes、Acidobacteria、Chloroflexi、Epsilonbacteraeota 與 Chlamydiae。其中 3 月份 2 個監測井與 8 月份 MW2 監測井地下水所含菌門前四名為 Proteobacteria、Bacteroidetes、Patescibacteria 與 Firmicutes，7 月份 MW2 監測井地下水所含菌門前四名為 Proteobacteria、Firmicutes、Bacteroidetes 與 Patescibacteria，而其他樣本之地下水所含菌門前四名為 Proteobacteria、Patescibacteria、Bacteroidetes 與 Firmicutes，顯示 Bacteroidetes 在持續加入高溶氧水後數量有減少之趨勢，而 Patescibacteria 與 Firmicutes 有增加之趨勢。

圖 4-40 列出所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度，此前十多的菌屬佔總菌量的 32—86%，於 3 月份 2 個監測井地下水所含優勢菌屬前 3 名為 *Pseudomonas*、*Cloacibacterium* 與 *Tepidiphilus*。監測井 MW1 於 6 月份地下水所含最優勢菌屬為 *Zoogloea*，而 7 月份地下水所含最優勢菌屬為 *Allorhizobium*、*Neorhizobium*、*Pararhizobium*、*Rhizobium* (固氮菌屬)，而 8 月份則是 *Tepidiphilus* 與 *Allorhizobium*、*Neorhizobium*、*Pararhizobium*、*Rhizobium*。監測井 MW2 於 6 月份地下水所含最優勢菌屬為 *Allorhizobium*、*Neorhizobium*、*Pararhizobium*、*Rhizobium*，而 7 月份與 8 月份地下水所含最優勢菌屬為 *Pseudomonas*。隨著時間增加 *Pseudomonas* (好氧菌) 與 *Cloacibacterium* (兼性厭氧菌) 的數量有減少的趨勢，而 *Zoogloea* 與 *Allorhizobium*、*Neorhizobium*、*Pararhizobium*、*Rhizobium* (皆為好氧菌) 有增加的趨勢。

以不同監測井來看，MW1 與 MW2 地下水中所含主要前 3 名菌門皆為 Proteobacteria、Bacteroidetes 與 Patescibacteria (如圖 4-41 所示)，而前 3 名菌屬於 MW1 依序為 *Allorhizobium*、*Neorhizobium*、*Pararhizobium*、*Rhizobium*、*Cloacibacterium* 與 *Pseudomonas*，前 3 名菌屬於 MW2 依序為 *Pseudomonas*、*Allorhizobium*、*Neorhizobium*、*Pararhizobium*、*Rhizobium* 與 *Cloacibacterium* (如圖 4-42 所示)。與尚未加入高溶氧水前之地下水菌優勢菌門與菌屬相較(圖 4-19 與 4-20)，加入高溶氧水後其地下水中優勢菌門與菌屬與未加入前不同，可見加入高溶氧水後顯著改變地下水之菌相。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

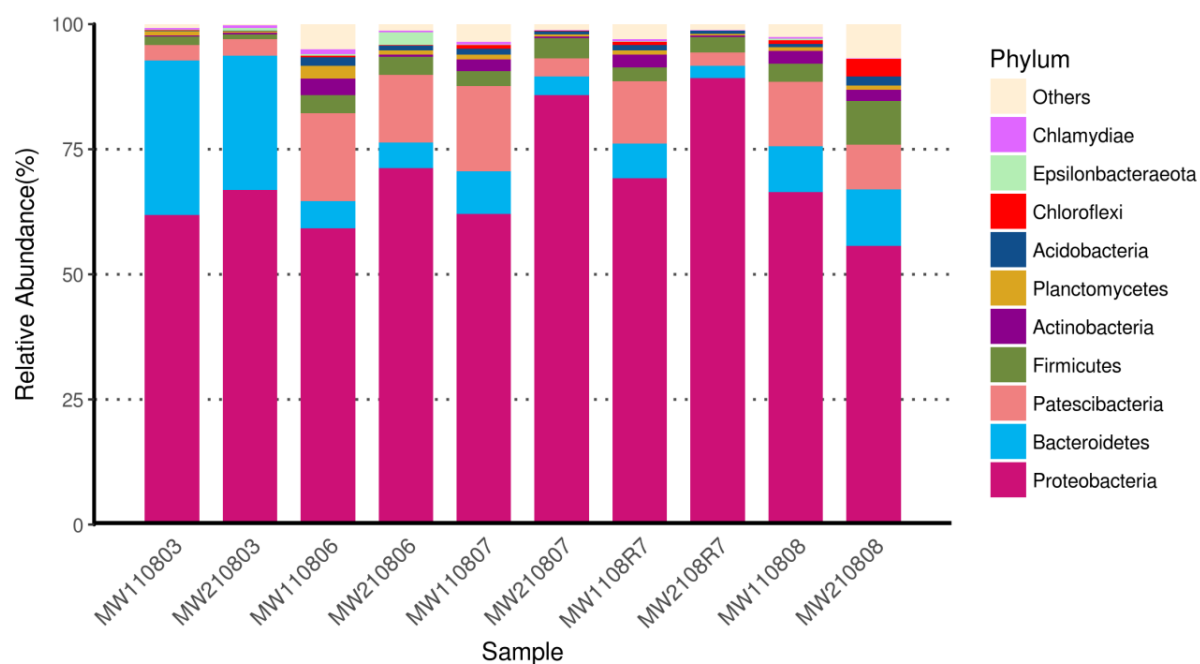


圖 4-39 不同時間採取的監測井地下水中所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度

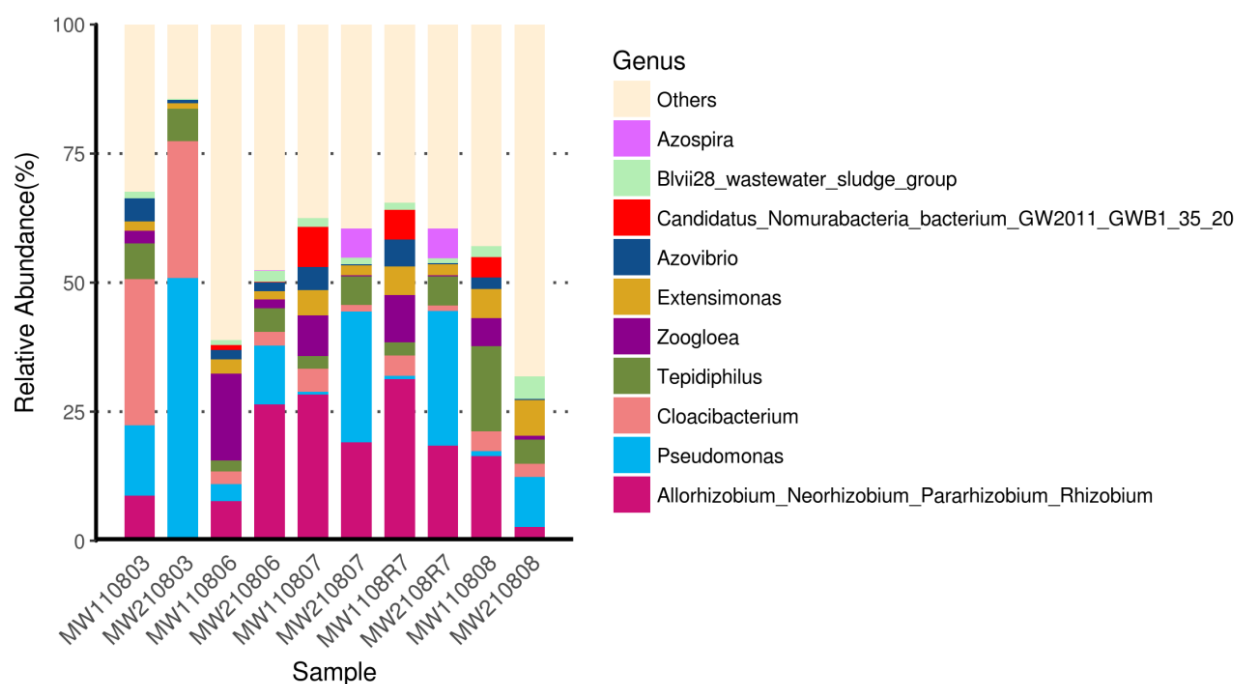


圖 4-40 不同時間採取的監測井地下水中所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度

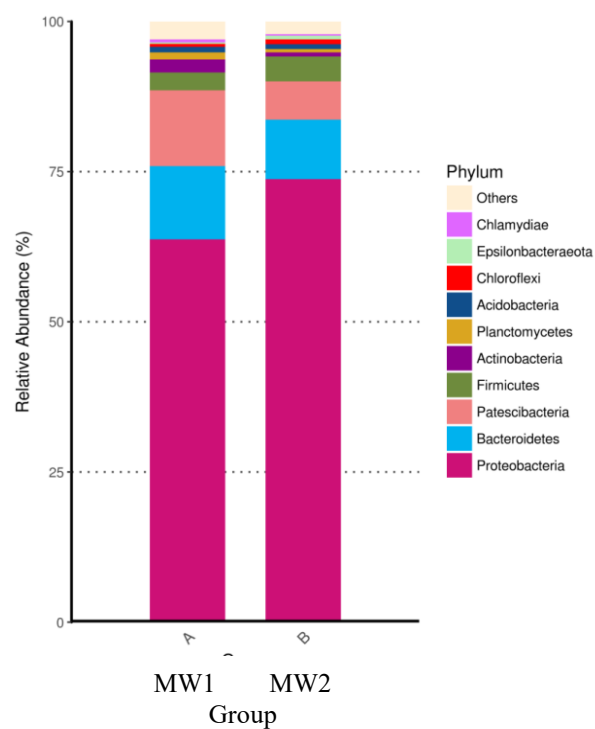


圖 4-41 2 個監測井地下水中所鑑別細菌的前十多的菌門相對豐度

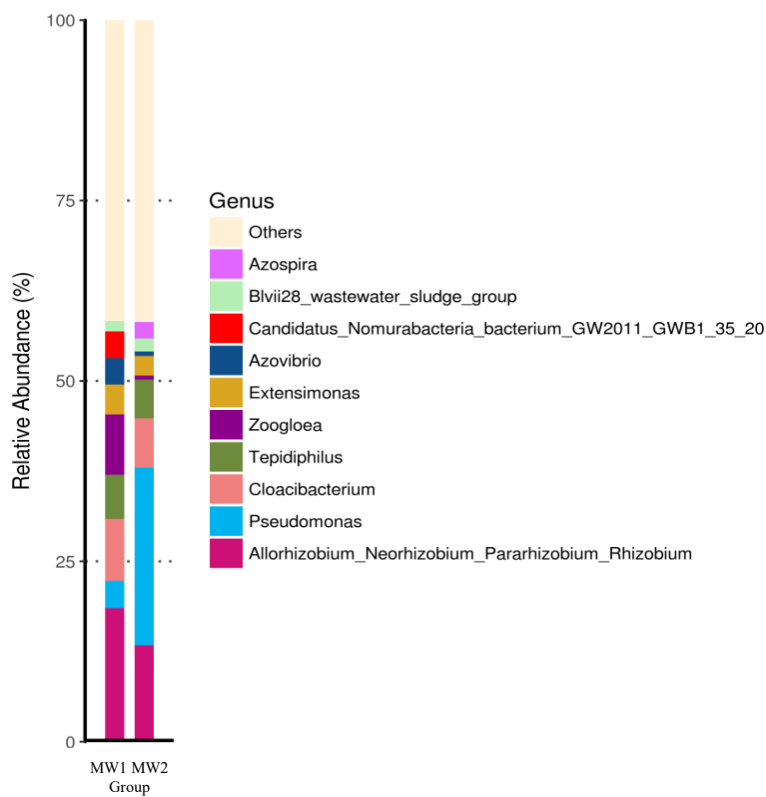


圖 4-42 2 個監測井地下水中所鑑別細菌的前十多的菌屬相對豐度



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

LEfSe [Linear discriminant analysis (LDA) Effect Size]是用以找到不同監測井中地下水菌相豐度顯著差異物種，採用線性回歸判別分析(LDA)來估算每個物種豐度對差異效果影響的大小，找出對樣本劃分產生顯著性差異影響的群落或物種。如圖 4-43 所示，於 MW1 監測井地下水中 *Azovibrio*、*Candidatus Nomurabacteria bacterium GW2011_GWB1_35_20*、*Parcubacteria*、*Zoogloea* 與 *Rhodocyclaceae* 之數量顯著多於 MW2 監測井，而 MW2 監測井地下水中 *Pseudomonas resinovorans* 與 *Pseudomonas stutzeri* 之數量顯著高於 MW1 監測井。

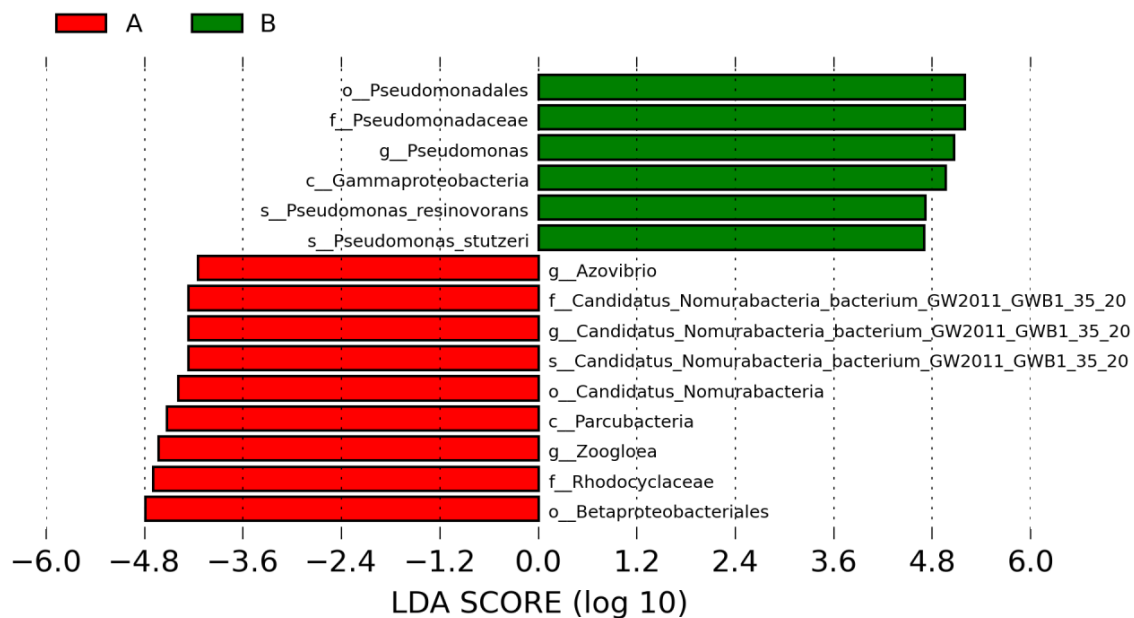


圖 4-43 LEfSe 分析所獲得之不同監測井中地下水菌相豐度顯著差異物種



4.9 油品分解菌添加試驗

依本計畫規畫於2019年8月22日進行油品分解菌添加測試，此試驗所投入之菌種為 *Enterobacter tabaci* (圖4-44)，本菌種於2009年自中油公司橋頭供油中心篩選出，並曾於2011至2013年兩年期間施用於屏東縣九如九清段1340地號，石油碳氫化合物公告污染場址中進行現地生物復育模場試驗。

在預先了解及推估菌種之生長曲線後，菌種先於實驗室中進行培養 5 小時，投菌前培養基之 OD₆₀₀ 為 0.559 A，後使用打氣泵曝氣提供菌種所需氧氣，培養體積為 10 L，培養完成後再以培養液稀釋至 20 L，再轉移至實場於 GW1 投入 20 公升之分解菌培養液，其流程如圖 4-45 所示。

Bacteria Identification Analysis Report

No: PB1907300012
Date: 2019/8/6

Vendor name: 高師大環境微生物系
Sample name: : NKNU12
Sample Qty: 1 plate
PCR amplification of bacterial 27F and 1492R 16S rDNA gene regions
Sequencing primer: 530F and 805R
Database: NCBI 16S ribosomal RNA sequences
16S rDNA full-length sequence:
TCAGATTGAACGCTGGCGCAGGCTAACACATGCAAGTCGAGCGGACCGGAAAGTAGCTTCTACTTTGCCGCGA
GCGGCGGACGGGTGAGTAATGTCTGGGAACTGCTGATGAGGGGGATAACTACTGGAAACGGTAGCTAATACCGCA
TAACGTCCCAAGACCAAGAGCGGAGCTTCCGGCTCTTGGCATCAGATGTGCCAGATGGGATTAGCTAGTAGGTG
GGTAACGGCTCACTAGCGGACGATCCCTAGCTGTCTGAGAGGATGACGACCACTGGAACTGAGACACGGTCC
AGACTCTACCGGACGACAGCTGGGGAATATTGCACAATGGCGCAAGCTGATCCAGCCATGCCGCTGTATGAAG
AAGGCTTCCGGTTGTAAGTACTTTTACCGCGGAGGAAAGTGTGAGGTAAATAACCTCAGCAATTGACGTTACCGG
CAGAAGAAGCACCGCTAACTCCGTCCAGCAGCGCGGTAATACGAGCGGTGCAAGGTTAATCGGAATTACTGGC
GTAAAGCGCACGACGGCGTCTGTCAAGTCCGATGTGAAATCCCGGGCTCAACTGGGAACTGCATTGCAAACTGCC
AGGCTAGAGTCTTGTAGAGCGGGTAGAATTCCAGTGTGAGCGTGAATGCTAGAGATCTGGAGGAATACCGTGG
CGAAGCGCGCCCTGGACAAAGACTGACGCTCAGGTCCGAAAGCTGGGGAGCAACAGGATTAGATACCTGTGTAG
TCCACCGCTAAACGATGTGACTTGGAGTTGTCCCTTGAGCGTGGCTTCCGGAGCTAACGCTTAAGTTCGACCG
CTTGGGAGTACCGCCCAAGGTTAAACTCAATGAATTGACGGGGCCCGCACAGCGGTGGAGCATGTGGTTTAA
TTGATGCAACGGGAAGAACCTTACCTACTCTTGACATCCAGAGAACTTCCAGAGATGGATTGGTGCCTTCCGGAA
TCTGAGACAGGTCTGTCATGGCTGTCTGAGCTCGTGTGAAATGTTGGTTAAGTCCCGCAACGAGCGCAACCT
TATCCTTTTGTGCGAGCGTCCGGCCGGAAGCTCAAGGAGACTGCCAGTGATAAAGTGGAGGAAGTGGGATGAG
TCAAGTCATCATGGCCCTTACGAGTAGGGCTACACAGTCTTACAATGGCGCATACAAGAGAAAGCGACCTCCGAGA
GCAAGCGGACCTCATAAGTGGTCTGTAGTCCGATTGGAGTCTGCAACTGACTCCATGAAGTCGGAATCGCTAGTA
ATCGTAGATCAGAACTACGGTGAATAGTTCCCGGCCCTTGTACACACCGCCGTCACACCATGGGAGTGGGTG
CAAAAGAGTAGTAGCTTAACCTTTCCGGAGGCGCTTACCACCTTTGTGATTGATGACTGGGTGAA

Results: *Enterobacter tabaci*



Operator: J. Q. W.
Lab manager: YA-WEN LEE
Tri-I Biotech, Inc.
Date: 2019/8/6

圖 4-44 菌種鑑定報告



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

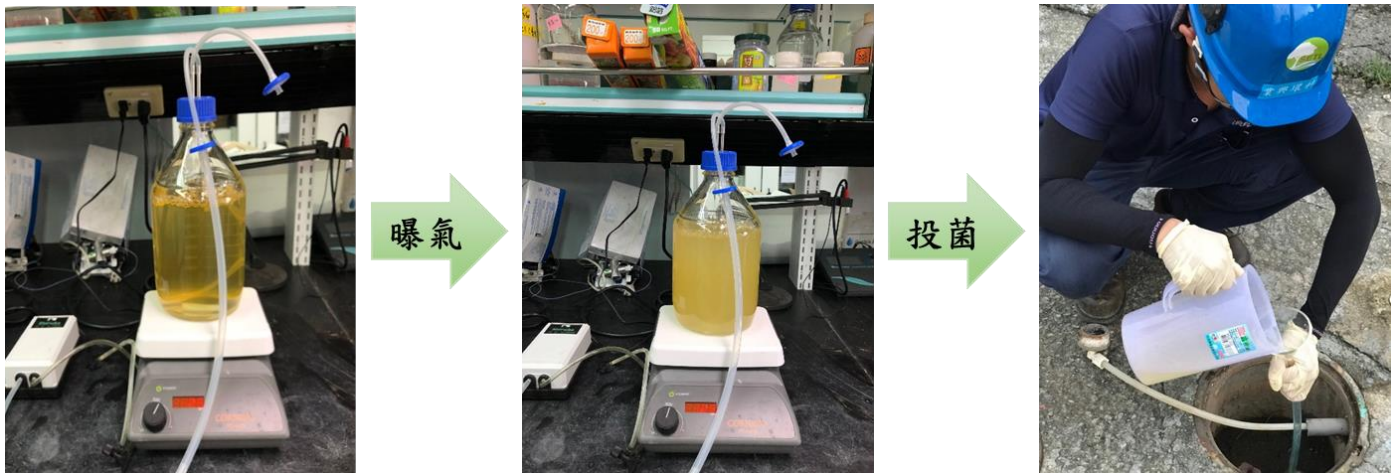


圖 4-45 菌種培養流程



4.10 綜合討論

綜合本計畫於實驗室及模場試驗所獲得之結果，第一階段實驗室試驗的部分利用管柱試驗及砂箱試驗來找出最佳操作條件，結果顯示管柱以垂直狀態之溶氧變化較為和緩，經由砂箱試驗可發現高溶氧水會因傳輸距離越遠，其水中溶氧量會越少且消散速度較快越長，其溶氧遞減率可做為污染場址實場操作之參考。

第二階段完成模場試驗超高溶氧奈米水抽注注入試驗，在採用 8 hr/day 及 12 hr/day 間歇注入頻率中，距離注水端較遠之監測井 MW2 溶氧上升幅度沒有距離注水端較近之監測井 MW1 上升顯著，因本場址之地下水流向為東南往西北方向流，故主要影響 MW2 之溶氧變化推測為注水井 GW1，MW2 距離注水點 GW1 約 1 公尺，高溶氧水在地下環境中經過傳輸造成一定量的消散，溶氧濃度可能因撞擊土壤孔隙後消散；而在連續 24 小時注入高飽和溶氧水後，MW2 之溶氧有大幅度的提升，因此持續注入使高溶氧水更擴大溶氧影響半徑且持久不消散，致使溶氧得以提高，此點可做為實場操作之參考。

本計畫期望藉由溶氧的提升使微生物濃度增加，進而加速降解污染物，觀察不同注水頻率對於微生物生長及污染物降解的影響(圖 4-46、圖 4-47)，結果顯示注水頻率越長，地下水之溶氧越高，但會影響微生物的濃度，因此最後決定每天灌注 12 小時的高溶氧水。

對比灌注一年期間前後的目標污染物檢測數據可得知(表 4-31)，無論是灌注高溶氧水或添加油品分解菌後，污染物濃度已大幅下降，在五個井位均呈現此趨勢，但乙苯及苯仍具高濃度，尤其乙苯仍是主要污染物，在地下水樣品常有純相出現，至於污染物濃度大幅下降是灌注水稀釋或生物降解作用旺盛何者貢獻較多甚難判斷。

表 4-31 地下水污染物濃度比較
(單位：mg/L)

	GW1		GW2		GW3		MW1		MW2	
採樣時間	2018/ 09/07	2019/ 09/26	2018/ 09/07	2019/ 09/26	2018/ 09/07	2019/ 09/26	2018/ 09/07	2019/ 09/26	2018/ 09/07	2019/ 09/26
Benzene	235	ND	219	ND	266	ND	197	12.1	258	15.1
Toulene	16.0	ND	16.0	ND	ND	ND	16.0	1.15	13.0	1.40
Ethylbenzene	5398	1.25	5269	9.50	4595	3.10	4984	348	4121	639
Styrene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.30	ND	ND



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

完成建立現場菌相分析，不管是哪一監測井所採集之地下水中，細菌物種數皆隨著持續加入高溶氧水後逐漸增加，特別是 MW1 監測井，其地下水中細菌物種數增加速度與數量皆高於 MW2 監測井，可能是 MW1 監測井較靠近於注入井 GW1 (相距 0.3 m) 而能獲得較多之氧氣所致。菌相分析顯示同時加入高溶氧水可能促進同一類型菌種大量生長，而使得兩個監測井地下水菌相差異度減小。

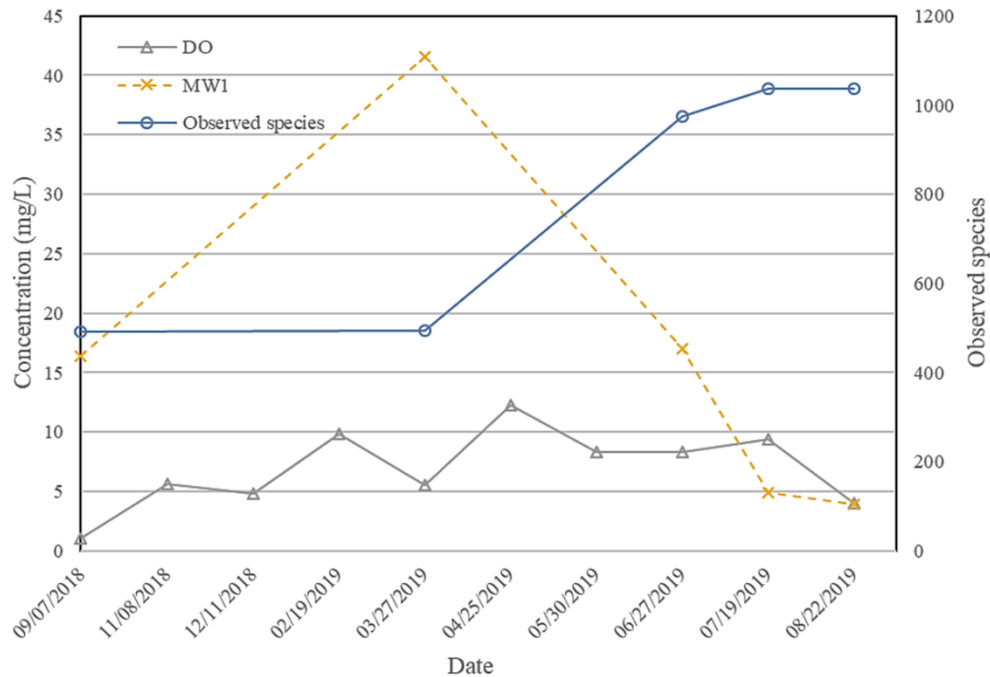


圖 4-46 監測井 MW1 之溶氧與菌相濃度關係圖

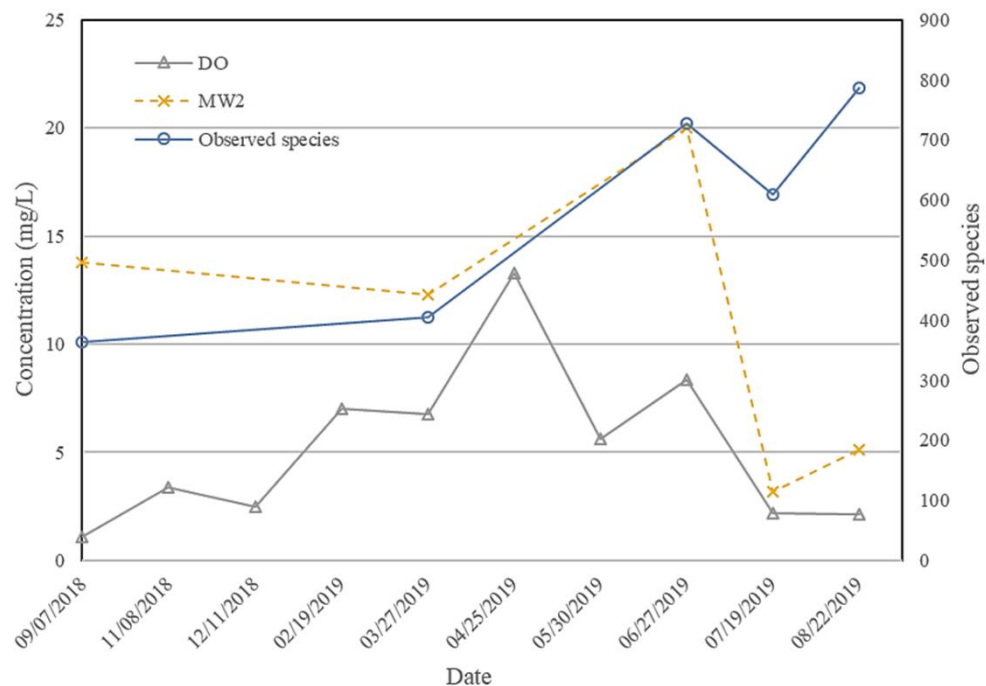


圖 4-47 監測井 MW2 之溶氧與菌相濃度關係圖



第五章、結論與建議

本研究團隊基於過去對於石化污染場址現地生物整治技術之研究經驗及成果，應用奈米氣泡產生設備做為一新穎的氧氣供給方式，並利用奈米級氣泡顆粒小、持久性高的特性，讓產生之氧氣得以透過水力控制的方式通過微小的土壤孔隙，相較於傳統利用現地曝氣井方式，氣泡無法有效進行水平傳輸，故本研究之方法擬突破傳統曝氣法氣體無法達到有效傳輸的限制。由兩年期計畫獲致以下成果：

1. 本計畫完成超高溶氧奈米水抽注試驗，建立現場操作參數，在採用 8 hr/day 及 12 hr/day 間歇注入頻率中，由於距離注水端較遠之監測井(MW2)溶氧上升幅度沒有距離注水端較近之監測井(MW1)上升顯著，而本場址之地下水流向為東南往西北方向流，故主要影響 MW2 之溶氧變化推測為注水井 GW1，MW2 距離注水點 GW1 約 1 公尺，高溶氧水在地下環境中經過傳輸造成一定量的消散，溶氧濃度可能因撞擊土壤孔隙後消散；而在連續 24 小時注入高溶氧水後，MW2 之溶氧有大幅度的提升，因此持續注入使高飽和溶氧水更擴大溶氧影響半徑且持久不消散，致使溶氧得以提高，但持續 24 小時灌注易造成電力之成本上升，同時灌注之大量水將造成溶解態污染物較易傳輸及擴散，經觀察不同注水頻率對於微生物生長及污染物降解的影響，結果顯示注水頻率越長，地下水之溶氧越高，但會影響微生物的濃度，因此最後決定每天灌注 12 小時的高溶氧水，此點可做為整場操作之參考。
2. 本計畫建立環境指標，對比灌注一年期間前後的目標污染物檢測數據可得知，污染物濃度已大幅下降，在五個井位均呈現此趨勢，但乙苯及苯仍具高濃度，尤其乙苯仍是主要污染物，在地下水樣品常有純相出現，至於污染物濃度大幅下降是灌注水稀釋或生物降解作用旺盛何者貢獻較多甚難判斷。
3. 本計畫完成建立現場微生物指標。無論是哪口監測井所採集之地下水中，細菌物種數皆隨著持續加入高溶氧水後逐漸增加，特別是 MW1 監測井，其地下水中細菌物種數增加速度與數量皆高於 MW2 監測井，可能是因 MW1 監測井較靠近於注入井 GW1 (相距 0.3 m) 而能獲得較多之氧氣所致。
4. 本計畫完成石化污染物降解菌添加試驗，污染物濃度仍呈現下降，在五個井位均呈現此趨勢。
5. 完備本研究擬發展之技術與方法，在技術應用的可行性上，本研究立基於水力控制方法，因此只要水文地質環境適宜，便可以應用本研究所發展之技術。



以超高溶氧奈米氣泡水強化現地生物整治技術試驗計畫

本研究所發展之技術，在未來發展上可以預期有更多之技術發展方向：(1)配合循環井或抽注井場，可做為未來被動式整治之工法，對於未來工業區或運作中場址之周界污染控制將產生極大貢獻，符合綠色及永續整治之原則。(2)奈米氣泡之產生設備如與臭氧產生機結合，預期可提升臭氧於水中的濃度與持久性，而突破傳統臭氧現地化學氧化方法的限制。(3)本計畫所採用之奈米氣泡產生技術，乃是利用物理方法取代水分子團間隙的氮氣，而產生極小的奈米氣泡，因此一方面可加速揮發性有機物的揮發，另一方面可能可進一步應用超音波特性，利用能量強氧化或破壞水中的污染物。

目前奈米氣泡水於土壤及地下水污染整治之研究於國內外應用亟少，本計畫為一創新性之研究，期望可透過本研究之成果，擴大奈米氣泡水於我國土壤及地下水污染整治工作的應用。



第六章、參考文獻

- 賴鴻裕、劉程煒及陳柏青，(2011)，農業上的氮，科學發展，2011/11-467，台北。
- Agarwal, A., Ng, W.J., Liu., Y. (2011) Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment, *Chemosphere*, 84, 1175-1180.
- Li H., Hu, L., Song, D., Al-Tabbaa, A. (2014) Subsurface transport behavior of micro-nano bubbles and potential applications for groundwater remediation, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11, 473.
- Lindsay, W.L. (1979) *Chemical Equilibrium in Soils*. A Wiley-Interscience Publication, New York.
- Ma, Y., Kong, X.-Z., Scheuermann, A., Galindo-Torres, S.A., Bringemeier, D., Li, L. (2015) Microbubble transport in water-saturated porous media, *Water Resources Research*, 51, 4359-4373.
- Santos, I.R., Eyre, B.D., Huettel M. (2012) The driving forces of porewater and groundwater flow in permeable coastal sediments: A review, *Estuarine Coastal Shelf Science*, 98, 1–15.
- Saunders, D.F., Burson, K.R., Thompson C.K. (1999) Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations, *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin.*, 83, 170–185.
- Selker, J., Niemet, M., McDuffie, N., Gorelick, S., Parlange, J.-Y. (2007) The local geometry of gas injection into saturated homogeneous porous media, *Transp. Porous Media*, 68, 107–127.
- Sumikura M., et al. (2007) Ozone micro-bubble disinfection method for wastewater reuse system. *Water Science and Technology*, 56, 53–61.
- Temesgen, T., Bui, T.T., Mooyoung Han, M., Kim, T., Park, H. (2017) Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 246, 40-51.