



## 行政院環境保護署

110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

# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用 水安全調適方案

期末報告(定稿)

主辦單位：  行政院環境保護署  
專案執行單位： 淡江大學學校財團法人淡江大學／  
水環境資訊研究中心  
專案主持人： 王聖璋 助理教授  
專案執行期間： 110年3月19日起至111年2月28日止

中華民國111年3月印製





# 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 | 110年度                    | 計畫類型    | ■研究型 □模場型 |
| 計畫類別 | □調查 □整治 ■其他              | 主持人：王聖瑋 | NO：A6     |
| 計畫名稱 | 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案 |         |           |

| 委員審查意見                                                                                                                                                       | 計畫單位回覆                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (一) 委員一                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                     |
| 地下水富砷地區濃度變化即便是來預測還是具有極高的不確定性，加上用水標的不一，取水地層（深度不同）水井數量龐大，調適方案之研擬必須考量可執行性。                                                                                      | 感謝委員建議，本研究最終目標為建立地下水砷濃度預測模型，執行過程最重要的關鍵為確立龐大的農業抽水行為對地下水氧化還原狀態改變的影響，因此目前規劃模型主要針對雲林彰化地區主要的農業用水深度，即第一含水層，此外，亦考量抽水井為數眾多，故採用機器學習模型以克服傳統抽水相關數值模式之計算量過高的問題，整體執行成果將依據上述重點研擬農業灌溉用水的調適方案，並搭配農業與水利單位既有施政方向，以確保本計畫研提之調適建議具實務可行性。 |
| (二) 委員二                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                     |
| 應具發展潛力。                                                                                                                                                      | 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                             |
| (三) 委員三                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                     |
| 1.主持人與計畫執行團隊<br>(1)主持人(協同主持人)與執行團隊的研究及技術研究發展績效良好。<br>(2)主持人與執行團隊的研究能力及技術發展能力佳，足以勝任本計畫。(延續性:計畫主持人在其他機構已執行過類似計畫，足以勝任本計畫)                                       | (1)感謝委員肯定。<br>(2)感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                            |
| 2.本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義<br>(1)本專案計畫對國內地下水污染調查的發展具有貢獻。<br>(2)本計畫書撰寫具體，對研究方法的說明完整，研究方法與試驗流程具可行性。<br>(3)本計畫的成果具有潛在的實場應用性。<br>(4)本計畫為已執行多年的計劃的延續性計畫。(以主持人執行過的計劃而言) | (1)感謝委員肯定。<br>(2)感謝委員肯定。<br>(3)感謝委員肯定。<br>(4)感謝委員肯定。<br>(5)感謝委員肯定。<br>(6)本計畫主要探討地下水砷濃度隨季節變化的成因，由前人研究指出氧化還原條件的改變係為主要影響因子，而造成氧化還原條件改變的                                                                                |



| 委員審查意見                                                                                                                                                                                                                                             | 計畫單位回覆                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(5)主持人與執行團隊曾執行過土污基金會的研究計畫(或實務性計畫)，之前的專案執行績效佳。</p> <p>(6)建議說明本計畫成果實務應用的適用情境(例如:地下水質的長期穩定性)與應用的限制條件。(例如:抽水頻率、抽水量、井篩...等等的影響)(原計畫書中說明:“...本計畫研究目的為探討抽用地下水造成砷濃度變化程度，建立地下水砷濃度變化預測模型...”，所以，取樣或探討的情境與該情境的外溢限制(或條件)須評估討論)</p> <p>(7)初期計畫構想書的意見已說明。</p> | <p>原因包括降雨與人為抽水，前者已有氣象局累積之觀測資料，後者則為本計畫資料收集重點，依據經濟部水利署長期調查成果，目前已有雲林與彰化地區農業水井的基本資料，包括座標、深度、與逐月用電度數，因此透過用電度數與水井規格轉換之抽水量，即可做為評估抽水行為對於氧化還原條件與砷濃度改變之影響，因此，本計畫探討情境係針對農業灌溉與地下水砷濃度變化之關聯，以做為未來不同季節之農業灌溉取用地下水的調整參據。</p> <p>(7)感謝委員肯定。</p> |
| <b>(四) 委員四</b>                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                               |
| 1.釐清豐枯水期水文條件改變與人為抽水對於地下水砷濃度變化影響，可作為強化水資源使用與管理之平衡關係，進而建立地下水砷濃度預測模型，將有助於枯水期地表水與地下水調度時之參考。                                                                                                                                                            | 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                       |
| 2.計畫主持人長期研究臺灣地下水砷污染發生機制與用水管理，對於環保署針對砷污染議題之管理與跨單位研商的需求，有深入瞭解及掌握。                                                                                                                                                                                    | 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                       |
| 3.結合機率分布與機器學習方法，建立地下水砷濃度變化預測模型，符合重點優先項目。                                                                                                                                                                                                           | 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>(五) 委員五</b>                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                               |
| 1.本研究計畫之 KPI 多項提出，值得肯定。                                                                                                                                                                                                                            | 感謝委員肯定，本研究計畫執行過程將盡力達成設定之 KPI 目標。                                                                                                                                                                                              |
| 2.有多位碩博士生參與，亦值得肯定。                                                                                                                                                                                                                                 | 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                       |
| 3.研究方法及最後之成果，敘述詳實，結合大數據及 AI 之方法，是目前政府鼓勵之政策方向。                                                                                                                                                                                                      | 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>(六) 委員六</b>                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                               |
| 大數據分析預測，屬於比較特別的角度，並無其他類似計畫，可試。                                                                                                                                                                                                                     | 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>(七) 委員七</b>                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                               |
| 用水安全調適方案部分可再深化以增加成果之實務性。                                                                                                                                                                                                                           | 感謝委員建議，本計畫將於期末報告深入探討富砷地下水用水安全調適方案。                                                                                                                                                                                            |
| <b>(八) 委員八</b>                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                               |
| 相關變數宜簡化，確保計畫能有具體目標。                                                                                                                                                                                                                                | 本計畫擬收集分析的動態資料主要包括地下水水質、地下水抽取量、降雨量，並以月平均的                                                                                                                                                                                      |





| 委員審查意見                                                                                                                          | 計畫單位回覆                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                 | 方式降低資料維度，以達到變數簡化之目的，並確保模型的可操作性。                                              |
| (九) 委員九                                                                                                                         |                                                                              |
| 1.(一)人事費用編列超過(一)~(五)總和的50%，請於修正計畫書來文補充說明。                                                                                       | 感謝委員建議，已於修正計畫書之提送公文說明人事費用占比較高之原因。                                            |
| 2.(一)人事費用：<br>(1)附件11-48考量預計計畫執行期程建議人事費以編列11個月為上限。<br>(2)附件11-50考量補助計畫以培育人才為目的，建議專任人員任職以5個人月為限，優先聘任兼任人員，本案已編列4位兼任人員，建議酌減專任人員人月。 | (1)已調整本計畫執行期程之編列月份，皆編列為11個月。<br>(2)已調整專任人員之編列月份為5個月。                         |
| 3.附件11-51(三)消耗性器材及主要費用：電腦相關週邊物品應敘明與計畫性質及工作項目關性，因滑鼠、鍵盤屬財產且可使用年限久，建議分年攤提購置並酌減。                                                    | 感謝委員提醒，已修正消耗性器材及主要費用編列方式及經費。                                                 |
| 4.附件11-53(五)雜項費用<br>(1)報告書印刷編列上限建議為40本(300 元/本)共12,000元、其他雜項費用以11個月為限編列。<br>(2)論文編輯費用請敘明與本計畫案相關。                                | (1)已調整報告書編列方式為40本(300元/本)共12,000元，其他雜項費用則編列11個月。<br>(2)考量論文編輯費用較難預估，已刪除此項費用。 |



# 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 審查意見回復對照表

|                                                                                                                      |                          |                                                                                                                                                                                                  |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 計畫年度                                                                                                                 | 110年度                    | 計畫類型                                                                                                                                                                                             | ■ 研究型   □ 模場型      |
| 計畫類別                                                                                                                 | □ 整治   □ 調查   ■ 其它       |                                                                                                                                                                                                  | 主持人：王聖璋      NO：A6 |
| 計畫名稱                                                                                                                 | 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案 |                                                                                                                                                                                                  |                    |
| 委員審查意見                                                                                                               |                          | 計畫單位回覆                                                                                                                                                                                           |                    |
| 委員一                                                                                                                  |                          | 1. 感謝委員建議，誠如委員所言，雲林及彰化地區民井數量極多，截至 110 年 11 月底止，彰化縣及雲林縣有效水權井分別為 2,089 口、3,582 口，而申報納管之水井數量分別為 153,659 口、162,124 口，水權井及納管井之數量懸殊極大，代表多數水井僅申報納管而尚未申請水權，因此，本計畫是將申報納管之水井資料當做該地區實際之水井數量，其餘未申報納管數量則不予討論。 |                    |
| 1. 本計畫首創使用經濟部水利署水井複查之抽水用電量等資訊作為推估地下水抽水量與砷濃度之關聯性探討。由於所掌握的資訊屬於已經納管的水井，但在實務上雲林及彰化地區存在未納管或者是私設地下水井其數量與規模甚巨，是否會影響到本計畫之推估？ |                          | 2. 目前預測模式為根據前兩個月用電量預測砷濃度，因此，資料頻率與詳細度不同將導致訓練資料量稍嫌不足，將導致模型可能無法有效地學習用電量與砷濃度之關係，或者導致模型過度擬合。此次計畫嘗試採用整合各監測井資料增加資料量，然而，由於各監測井砷濃度趨勢差異較大，並無法有效提升模型之表現。未來，將針對個別監測井模擬砷濃度隻趨勢，產生更多訓練資料，以提升模型之效能。              |                    |
| 2. 用電量的資料可細分至每月或日，但是地下水採樣分析的頻率一年僅數次而已，這些資料的頻率與詳細度不同是否能夠符合這些預測模式的前提，以及可能會造成哪些分析上的困難應該說明如何處理？                          |                          | 3. 感謝委員建議，本計畫已於期末報告彙整「建構富砷地下水及農地土壤砷濃度預警管理機制計畫」，對於現行行政院環境保護署、經濟部水利署及行政院農業委員會等單位之砷污染高潛勢區域管理策略及預警配套措施，而本計畫將對此提出後續建議之實質做法及精進方式，供管理單位參考。                                                              |                    |
| 3. 針對未來不同的情境將研擬用水安全調適方案與配套措施，長期以來地下水抽用最難管理的部分就是水井的數量太多，使用者為升斗小民，很難作統一的管理及落實執行，對於所研擬的政策必須考量政策的可執行性。                   |                          |                                                                                                                                                                                                  |                    |
| 委員二                                                                                                                  |                          | 1. 謝謝委員提醒，期末報告已將導傳遞神經網路成果加入比較，儘管導傳遞神經網路成果較其他方法佳，但因為資料數量偏低，模型可能稍嫌過度擬合，未來將會進行更多測試。                                                                                                                 |                    |
| 1. 計畫原規劃之工作方法預計採用 4 種機械學習模型：1 線性回歸 2 隨機森林 3 支持向量機 4 人工神經網路。但目前報告只呈現方法 1 到 3 之如果，尚未有倒傳遞神經網路的成果加入比較。                   |                          | 2. 合併不同測站進行建模原因為增加更多訓練資料，然而，各監測井砷濃度趨勢差異較                                                                                                                                                         |                    |
| 2. 三個國小資料合併後之預測結果，雖然相關                                                                                               |                          |                                                                                                                                                                                                  |                    |



|                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>係數 cor 比個別國小為佳，但誤差 mae，誤差 mse 皆比原先個別國小之預測結果為高，宜解釋其意義。</p>                                                                                                                          | <p>大，並無法有效提升模型預測精確度之表現。即便相關係數較佳，僅表示資料增加時對於趨勢的預測得以掌握，但是，預測數值的精確度無法有效提升。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>委員三</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 請補充說明「目標監測井」之篩選依據，為何不就有砷測值之監測井全數分析之。</li> <li>2. 建議再行確認灌溉抽水井與電表位置是否一致。</li> <li>3. 請補充說明目標監測井水質測值與「周遭最佳影響水井」砷濃度變化之關聯。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議，由於砷濃度在低於監測標準情形時，除了監測數據大多低於監測標準之外，其變化趨勢亦不明顯，意即不用透過模型預測就可以知道該口砷濃度都是低於監測標準、甚至是檢測不出濃度，因此，本計畫除了考量砷濃度監測標準(第一類標準為 0.025 mg/L、第二類標準為 0.25 mg/L)之外，為掌握彰化縣與雲林縣平均砷濃度偏高之監測井，分別篩選砷濃度超過平均值(彰化縣平均砷濃度為 0.00953 mg/L、雲林縣平均砷濃度為 0.01457 mg/L)之監測井進行後續討論。</li> <li>2. 感謝委員建議，在資料前處理時，本計畫已發現一個電錶可能配到多口抽水井，也就是說一個電錶所記錄的用電度數是由多口抽水井用電抽水累計而成的，由於研究資料是從抽水井轉成電錶，於是將座標位置進行前處理說明如下，而本計畫所說的抽水井用電資料之座標，即是經處理過後的座標資訊。 <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 一個電錶搭配一個抽水井的情況，電錶就繼承原本抽水井的座標位置。</li> <li>(2) 一個電錶配到多口抽水井的情況，則將多口抽水井的座標(X和Y值)各別加總後取平均，即得到新的電錶座標。</li> </ol> </li> <li>3. 本計畫是利用動態因子分析找出造成每一口監測井砷濃度變化之周遭最佳影響水井數量及最佳影響距離，意即可以透過監測井周遭最佳影響水井之電表數據，擬合出該口監測井最適之砷濃度數據。</li> </ol> |
| <p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 今年五月以前嚴重乾旱的數據應該很難得，請考慮加入比對。</li> </ol>                                                                                           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議，本計畫經模型測試後，發現降雨量對於預測模型影響不大，原因為雨量站僅代表一個特徵，而用電資料則有數百個特徵，再加上用電資料時間範圍為 2007 年 1 月到 2018 年 6 月，並無包含 2021 年 5 月之用電資料，故本計畫並無將今年度之乾旱數據納入討論。</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 期中報告有依委員意見參採執行。</li> <li>2. 期中報告已完成基礎資料收集及前處理並完成動態因子分析工作，符合進度。</li> <li>3. 引灌富砷地下水對於作物之吸收後可能影</li> </ol>                         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員肯定。</li> <li>3. 感謝委員建議，本計畫已於期末報告彙整「建構富砷地下水及農地土壤砷濃度預警管理機制計畫」，其中對於行政院環境保護</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |



響人體健康及土壤砷累積，建議期末時能提出最佳之因應方案。

署、經濟部水利署及行政院農業委員會等單位對於砷污染高潛勢區域之管理策略及預警配套措施，詳見期末報告第五章「五、引灌富砷地下水之調適與因應方案」。



## 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   審查意見回復對照表  
☐修正計畫書   ☒期末報告

|                                                                                                                                                                |                                                                |                                                                                                                                                                                                                                             |                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 計畫年度                                                                                                                                                           | 110年度                                                          | 計畫類型                                                                                                                                                                                                                                        | ■ 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別                                                                                                                                                           | <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查   ■ 其它 |                                                                                                                                                                                                                                             | 主持人：王聖璋   NO：A6                    |
| 計畫名稱                                                                                                                                                           | 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案                                       |                                                                                                                                                                                                                                             |                                    |
| 委員審查意見                                                                                                                                                         |                                                                | 計畫單位回覆                                                                                                                                                                                                                                      |                                    |
| 委員一<br>1. 專案成果績效自評表中所勾選之執行期程應修正為期末。<br>2. 專案成果績效自評表，所對應填寫之學術面、產業面、政策面成果也因以執行至期末的結果為依據。                                                                         |                                                                | 1. 已於定稿版修正，本計畫專案成果績效自評表之勾選內容。<br>2. 已於定稿版修正，本計畫執行至期末之學術面、產業面、政策面等具體研究成果。                                                                                                                                                                    |                                    |
| 委員二<br>1. 重要參數之一的抽水量，因無法以經驗公式轉換，故本計畫以用電量使用多項式回歸分析與蒙地卡羅模擬方法轉換為抽水量。應說明此轉換可能造成何種誤差的來源，以及誤差的程度。<br>2. 建議進一步分析本計畫預測模型所篩選出的高地下水砷濃度水井，其時間資料及空間資料的共同特徵，並以實際的物理化學機制解釋之。 |                                                                | 1. 由於目標監測井所在鄉鎮之水井，其馬達型式及馬達馬力接不相同，且井深及井徑多為申請人口述其可信度不高，再加上用水型態及電表型式亦不相同，因此，若無法直接採用經驗公式進行資料轉換，本計畫是直接以電量資料當作特徵值，避免轉換過程之不確定因素影響模型成果。<br>2. 感謝委員建議，本計畫預測模型所篩選出的高砷監測井周遭重要特徵水井，其目的以農業用水占大宗，且歷年用水型態固定，其結果與農業用水抽水導致地下水氧化還原變化，進而導致監測井所測得之地下水砷濃度偏高情形一致。 |                                    |
| 委員三<br>1. 報告建議在「章」以下再區分「節」，並列入目錄。<br>2. 「第五章一五」之內容建議再行修訂，「管理政策」似未結合研究成果；「結論與建議」也未歸納本計畫研究成果之可能應用方向。                                                             |                                                                | 1. 感謝委員建議，由於第五章篇幅較多，故已於定稿版新增第五章之小節標題。<br>2. 感謝委員建議，本計畫已彙整目前富砷地下水區域之管理政策，並歸納本計畫研究成果提出結論與建議，已於定稿補充結論與建議之說明。                                                                                                                                   |                                    |
| 委員四<br>1. 資料整理分析很有系統，結論可參考。驗收合格。                                                                                                                               |                                                                | 1. 感謝委員肯定。                                                                                                                                                                                                                                  |                                    |





|                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 專案基本資料表中關鍵字請補英文關鍵字?<br/>另專案主持人未簽名及蓋章和押日期?</li> <li>2. 計畫中文摘要及英文摘要請補關鍵字?</li> <li>3. 由於大部分農作物均是短期作物，井水中砷之濃度是否會累積到作物中?是否有文獻，否則啟動因應方案之機會可能不高?</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 已於定稿版修正，增加英文關鍵字及主持人簽章。</li> <li>2. 已於定稿版修正，增加計畫中文摘要及英文摘要之關鍵字。</li> <li>3. 環保署曾執行「自然背景砷地下水影響之農地土壤調查及整治技術評估計畫」及「自然背景富砷地下水影響之農地土壤及地下水砷移除技術試驗與發展計畫」，此兩計畫已由實驗室及現地試驗釐清地下水砷濃度與土壤及不同作物之相關性。臺灣農作物雖是短期作物，然水稻之用水量及灌水時間長，若長期抽用富砷地下水進行灌溉，將造成水中砷濃度累積至土壤中，進一步造成作物之砷濃度累積，因此衛生福利部亦於108年公告穀類無機砷及總砷之標準，故當發生作物砷濃度累積時，目前已有相關水、土、作物標準，供各級主管單位依循及管理。</li> </ol> |
|                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |



## 專案基本資料表

|               |            |                                                                                                          |            |                                  |                   |                                                                      |  |
|---------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------|--|
| <b>專案性質</b>   |            | <input type="checkbox"/> 實驗性質 <input checked="" type="checkbox"/> 非實驗性質                                  |            | <b>專案類別(單選)</b>                  |                   | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |  |
| <b>研究主題</b>   |            | <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 其他           |            |                                  |                   |                                                                      |  |
| <b>申請機構系所</b> |            | 淡江大學學校財團法人淡江大學／水環境資訊研究中心                                                                                 |            |                                  |                   |                                                                      |  |
| <b>機構地址</b>   |            | 251301 新北市淡水區英專路151號                                                                                     |            |                                  |                   |                                                                      |  |
| <b>專案主持人</b>  |            | 王聖璋                                                                                                      |            | <b>職等／職稱</b>                     |                   | 淡江大學水資源及環境工程學系助理教授                                                   |  |
| <b>協同主持人</b>  |            | 洪炯宗                                                                                                      |            | <b>職等／職稱</b>                     |                   | 國立中央大學資訊工程學系教授                                                       |  |
| <b>專案名稱</b>   | <b>中文</b>  | 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案                                                                                 |            |                                  |                   |                                                                      |  |
|               | <b>英文</b>  | Development of groundwater arsenic variation prediction model and adaptation plan for water safety usage |            |                                  |                   |                                                                      |  |
|               | <b>關鍵字</b> | 地下水、砷、污染管理<br>Groundwater, Arsenic, Contaminant management                                               |            |                                  |                   |                                                                      |  |
| <b>執行期程</b>   |            | 自民國110年3月19日起至民國111年2月28日止                                                                               |            |                                  |                   |                                                                      |  |
| <b>專案主持人</b>  |            | 姓名：王聖璋                                                                                                   |            | Email：<br>wangsw@mail.tku.edu.tw |                   | 專線：(02)26215656#2716                                                 |  |
| <b>專兼任人員</b>  |            | 姓名：陳嫻仔                                                                                                   |            | Email：<br>o902108008@tmu.edu.tw  |                   | 專線：(02)26215656#3675                                                 |  |
| <b>經費分析總表</b> |            | <b>專 案 預 估 經 費</b>                                                                                       |            | <b>第一年<br/>金額</b>                | <b>第二年<br/>金額</b> | <b>編列說明</b>                                                          |  |
|               |            | 1.                                                                                                       | 人事費用       | 746,240                          |                   | (1~5項相加之50%為限)                                                       |  |
|               |            | 2.                                                                                                       | 貴重儀器使用含維護費 | 0                                |                   | (與計畫實驗相關)                                                            |  |
|               |            | 3.                                                                                                       | 消耗性器材與主要費用 | 47,837                           |                   | (與計畫主體相關)                                                            |  |
|               |            | 4.                                                                                                       | 其它研究相關費用   | 0                                |                   | (含差旅與租賃費用)                                                           |  |
|               |            | 5.                                                                                                       | 雜支費用       | 5,923                            |                   | (1~6項相加之5%為限)                                                        |  |
|               |            | 6.                                                                                                       | 行政管理費      | 80,000                           |                   | (1~5項相加之10%為限)                                                       |  |
|               |            | 7.                                                                                                       | 自籌款        | 0                                |                   | (自行籌備款項)                                                             |  |
|               |            | 申請補助金額(1~6項)                                                                                             |            | 880,000                          |                   | 總金額：880,000                                                          |  |
| 計畫總金額(1~7項)   |            | 880,000                                                                                                  |            | 總金額：880,000                      |                   |                                                                      |  |

專案主持人(簽名及蓋章)：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_







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

## 110年度專案成果績效自評表

### 一、專案基本資料

填表日期：111年3月2日

|        |                                                                                                  |                             |                                                                      |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 專案性質   | <input type="checkbox"/> 實驗性質 <input checked="" type="checkbox"/> 非實驗性質                          | 專案類別                        | <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 研究主題   | <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 其他   | <input type="checkbox"/> 整治 |                                                                      |
| 申請機構系所 | 淡江大學學校財團法人淡江大學<br>／水環境資訊研究中心                                                                     | 專案主持人                       | 王聖璋                                                                  |
| 專案名稱   | 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案                                                                         |                             |                                                                      |
| 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欄位中。

#### (一) 學術面

| 項目                                   |                  | 目標達成程度    | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或學術產出發<br>表名稱)               |
|--------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------------------------|
| A<br>學<br>術<br>產<br>出<br>及<br>活<br>動 | 1.國內投稿<br>(篇數)   | (1)論文     | 1         | 0         | 0         |              |                                            |
|                                      |                  | (2)研討會論文  | 1         | 0         | 1         |              | 110年度農業工程<br>研討會                           |
|                                      | 2.國外投稿<br>(篇數)   | (1)期刊論文   | 1         | 0         | 0         |              |                                            |
|                                      |                  | (2)研討會論文  | 0         | 0         | 1         |              | PAWEES 2021<br>International<br>Conference |
|                                      | 3.報告<br>(篇數)     | (1)技術報告   | 0         | 0         | 0         |              |                                            |
|                                      |                  | (2)研究報告   | 0         | 0         | 0         |              |                                            |
|                                      | 4.專著(本數)         |           | 0         | 0         | 0         |              |                                            |
|                                      | 5.辦理學術<br>會議(場數) | (1)研討/說明會 | 0         | 0         | 0         |              |                                            |
|                                      |                  | (2)成果發表會  | 0         | 0         | 0         |              |                                            |
|                                      |                  | (3)論壇     | 0         | 0         | 0         |              |                                            |
| B<br>人<br>才<br>培                     | 6.研發改良<br>技術(項數) | (1)已開發技術  | 1         | 0         | 0         |              | 以機器學習方式<br>建立砷濃度預測<br>模型                   |
|                                      |                  | (2)技術平台   | 0         | 0         | 0         |              |                                            |
|                                      | 7.研發人員<br>(人數)   | (1)碩士     | 2         | 0         | 2         |              | 時于凱、曹洧浪                                    |
|                                      |                  | (2)博士     | 0         | 0         | 2         |              | 古濤瑜、鍾佳儒                                    |
|                                      | 8.研究團隊<br>(個數)   | (1)跨領域團隊  | 1         | 1         | 1         |              | 水資源領域、資<br>工領域                             |
|                                      |                  | (2)跨機構團隊  | 1         | 1         | 1         |              | 淡江大學、中央                                    |



| 目標達成程度            |  |           | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或學術產出發<br>表名稱) |
|-------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------------------------|
| 育                 |  |           |           |           |           |              | 大學                           |
|                   |  | (3)形成研究中心 | 0         | 0         | 0         |              |                              |
|                   |  | (4)形成實驗室  | 0         | 0         | 0         |              |                              |
| 9.其他指標<br>(請自行命名) |  | (請自填)     |           |           |           |              |                              |

## (二) 產業面

| 目標達成程度       |                  |             | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料) |
|--------------|------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------|
| A 智慧<br>財產權  | 1.專利<br>(件數)     | 已核准         | 發明        | 0         | 0         | 0            |                               |
|              |                  |             | 新型/設計     | 0         | 0         | 0            |                               |
|              |                  |             | 合計        | 0         | 0         | 0            |                               |
|              |                  | 申請中         | 發明        | 0         | 0         | 0            |                               |
|              |                  |             | 新型/設計     | 0         | 0         | 0            |                               |
|              |                  |             | 合計        | 0         | 0         | 0            |                               |
| B 研發<br>技術轉移 | 2.先期技術<br>成果移轉   | 件數          | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              |                  | 授權金(仟元)     | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              |                  | 衍生利益金(仟元)   | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              | 3.技術移轉<br>(專利)   | 件數          | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              |                  | 授權金(仟元)     | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              |                  | 衍生利益金(仟元)   | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              | 4.技術移轉<br>(應用技術) | 件數          | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              |                  | 授權金(仟元)     | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              |                  | 衍生利益金(仟元)   | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|              | 5.可移轉<br>產業技術    | (1)技術(件數)   | 1         | 0         | 1         |              | 以機器學習方式建立砷濃度預測模型              |
|              |                  | (2)品種/系(件數) | 0         | 0         | 0         |              |                               |



| 目標達成程度            |            |            | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料) |
|-------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------|
| 項目                |            |            |           |           |           |              |                               |
| C<br>產學研<br>合作    | 6.促成合作研究   | 件數         | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|                   |            | 金額(仟元)     | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|                   | 7.促成投資     | 件數         | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|                   |            | 投資金額(仟元)   | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|                   | 8.促成取得業界科專 | 件數         | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|                   |            | 業界投資金額(仟元) | 0         | 0         | 0         |              |                               |
| 9.其他指標<br>(請自行命名) |            | (請自填)      |           |           |           |              |                               |

### (三) 政策面

| 目標達成程度            |                  |        | 申請預<br>估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或其他詳細資料) |
|-------------------|------------------|--------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------------------|
| 項目                |                  |        |           |           |           |              |                        |
| A<br>服務<br>便民     | 1.技術服務           | 次數     | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   |                  | 收入(仟元) | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   | 2.諮詢服務           | 次數     | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   |                  | 收入(仟元) | 0         | 0         | 0         |              |                        |
| B<br>政策<br>推動     | 3.協助政府推動<br>(件數) | (1)政策  | 1         | 0         | 1         |              | 提供重要特徵水井名單供後續優先調查之參考   |
|                   |                  | (2)法規  | 0         | 0         | 0         |              |                        |
| C<br>技術<br>效益     | 4.整治技術提升(%)      |        | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   | 5.整治成本降低(%)      |        | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   | 6.提升能源效率(%)      |        | 0         | 0         | 0         |              |                        |
| 7.其他指標<br>(請自行命名) |                  | (請自填)  |           |           |           |              |                        |

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

**學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)**

本計畫彙整跨單位之長期觀測資料，包括水質監測、降雨量、民井抽水資料等，並導入機器學習模型於地下水砷污染議題之應用，目前國際間雖有地下水砷濃度變化預測之相關文獻，然而本計畫收集地下水水井用電資料做為模型訓練基礎，為學術研究與分析技術之重要突破。已投稿件數包括國內研討會1篇(110年度農業工程研討會)、國外期刊1篇(PAWEES 2021 International Conference)。

**產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)**

砷屬於全球性之地下水及土壤污染議題，尤以東南亞國家最為嚴重，其涵蓋層面包括公共衛生、地質化學、水文地質、土壤化學、農藝管理、食品安全，目前對於地下水砷濃度的釋出成因已有顯著研究成果，本計畫研究成果之地下水砷濃度預測技術後續可輸出並應用於面臨地下水砷污染的其他國家，針對本計畫建立模型之必要參數評估其他國家應用之可行性，並透過預測模型的交流與推廣，提升臺灣於地下水砷污染預防與管理的具體成果。

**政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、核、場址管理等政策及法規研訂之參考)**

臺灣地下水砷污染議題由來已久，此自然成因所致之污染問題已嚴重影響地下水用水安全，農業灌溉長期引灌行為更影響農地土壤品質與作物生長安全等問題，國際間已有諸多研究顯示地下水的氧化還原條件為影響砷釋出速率的關鍵，因此本計畫利用前人研究結果，彙整造成氧化還原條件改變之參數，並篩選受人為抽水影響最大之用電量做為預測地下水砷濃度之重要參數，並提供政府地下水砷污染管理與用水安全調適方案之建議。



## 計畫中文摘要

近50年來，地下水砷污染問題已受到國際間高度關注，其主要影響地下水用水安全、農業灌溉與作物生長、人體健康危害等面向，而影響地下水砷濃度釋出過程與分布變化主要受到水文地質條件、生物地質化學反應、人為活動等因素的影響，臺灣地下水富砷問題由來已久，地下水富砷問題屬自然沉積環境還原反應伴隨產生之現象，並與地質沉積年代、質地、氧化還原條件等因素有關，富砷之鐵/錳氧化物為地層中砷的主要富集來源，臺灣西南部平原地區普遍且大量抽取地下水做為農業用途，已造成砷濃度累積於農地土壤。由於地下水砷釋出機制主要受到氧化還原條件影響，而自然條件之降雨入滲、河川補注，及人為活動之抽取地下水皆可能改變區域地下水氧化還原條件，目前雲林彰化地區地下水水井數量高達25萬口以上，農業灌溉期間的抽水致使地下水水位下降，且抽水過程導致地表氧氣進入淺層地下水，進而影響砷釋出至地下水之速率，因此，本計畫研究目的為探討抽用地下水造成砷濃度變化程度，建立地下水砷濃度變化預測模型，以強化水資源使用與管理之平衡關係，本計畫優先針對濁水溪沖積扇做為地下水砷濃度變化預測模型建立之研究區域，並收集地下水水位、地下水井資料、及降雨量做為模式基礎，由於地下水砷濃度僅在部分區域有明顯變化，故篩選9口目標監測井做為本計畫主要探討目標。由於各鄉鎮水井型態不同，導致抽水量無法以經驗公式進行轉換，故本計畫以用電量直接當成用水量做為模式模擬數據，主要研究方法為應用動態因子分析進行時序資料維度縮減與趨勢歸納，並找出監測井之最佳影響水井距離及名單，再利用隨機森林、線性迴歸、支持向量機、人工神經網路等機器學習方法，建立地下水砷濃度變化預測模型，再權重計算方式找出影響監測井砷濃度之重要特徵水井名單。本計畫執行成果提供評析各項調適與因應方案之可行性與效益，包括提供行政院環境保護署及農業委員會可能影響砷濃度變化之鄰近水井及特徵水井名單，提供做為定期監測、推動輔導作物轉作、抽測等之優先順序規劃參考名單，以確保未來土水環境品質與食品安全。

**關鍵字：**地下水、砷、污染管理。





## 計畫英文摘要

In the recently 50 years, groundwater arsenic pollution has received great international attention, which affects groundwater safety, agricultural irrigation and crop growth, and human health risk. Primary mechanism of groundwater As release and mobilization is mainly affected by hydrogeological conditions, biogeochemical reactions, human activities and other factors. The release mechanisms of arsenic-contained groundwater is the reduction reaction of the hydrogeochemical environment including the age, texture, and redox conditions of the geological deposition. Arsenic-rich Fe/Mn oxides are the main source of arsenic in geological formation. However, amount of groundwater is commonly extracted for agricultural purposes in the southwestern plains of Taiwan, which has caused arsenic concentrations to accumulate in agricultural soil. Since the arsenic release mechanism from groundwater is mainly affected by redox conditions, hydrological conditions such as rainfall infiltration, river refills, and extraction of groundwater may cause the variation of groundwater redox conditions. At present, the extended private wells in Yunlin and Changhua counties are as high as 250,000. Irrigation pumping during agricultural demand causes the groundwater level decrease, and also the intrusion of oxygen to shallow aquifer, which affects the rate of arsenic release to the groundwater. Therefore, the purposes of this project are to investigate the changes in arsenic concentration caused by pumping groundwater, to establish groundwater arsenic prediction model, and to strengthen the relationship between water resources utilization and management. Chuoshui river alluvial fan is collected as the study area to establish the groundwater arsenic prediction model. Groundwater level, private wells parameters, and rainfall records are adopted as the modeling data. Arsenic concentration in groundwater only changed significantly in some areas, so selected 9 target monitoring wells as the main research target. Furthermore, the types of private wells were different in each township, so this project used the electricity consumption directly as the water consumption in the model simulation data. Dynamic factor analysis will then be applied to conduct dimension-reduction of time-series data and to extract the trends of groundwater As variation. Moreover, machine learning approaches, including random forest, linear regression, support vector machine, artificial neural



network will be tested for As prediction. The accuracy of the groundwater arsenic concentration prediction model is established and verified by the water quality data. According to the groundwater As dynamic factor analysis and prediction model, the list of private wells with best distances and important characteristics affecting As concentrations can be selected. Adaptation strategies of groundwater usage and management will be proposed to Environmental Protection Administration and Council of Agriculture, and to ensure the quality of soil and water environment and food safety.

**Keywords:** Groundwater, Arsenic, Contaminant management.





## 目次

|      |                       |      |
|------|-----------------------|------|
| 第一章  | 前言 .....              | 1-1  |
| 第二章  | 研究目的 .....            | 2-1  |
| 第三章  | 文獻探討 .....            | 3-1  |
| 第四章  | 研究方法與過程 .....         | 4-1  |
| 第五章  | 結果與討論 .....           | 5-1  |
| 5.1  | 地下水砷濃度目標監測井篩選結果 ..... | 5-1  |
| 5.2  | 電量轉換抽水量評估結果 .....     | 5-5  |
| 5.3  | 動態因子分析 .....          | 5-13 |
| 5.4  | 機器學習預測模型建立成果 .....    | 5-30 |
| 5.5  | 引灌富砷地下水之調適與因應方案 ..... | 5-44 |
| 參考文獻 | .....                 | 文獻-1 |



## 圖次

|                                                            |      |
|------------------------------------------------------------|------|
| 圖1-1、臺灣近十年(2009~2018年)水資源蘊藏量及用水量統計圖.....                   | 1-2  |
| 圖2-1、本計畫研究目的及重要性.....                                      | 2-1  |
| 圖3-1、監測井歷年地下水砷濃度(以雲林縣台西國小與彰化縣新寶國小為例).....                  | 3-2  |
| 圖3-2、地下水砷濃度潛勢分布地圖(行政院環境保護署，2019).....                      | 3-5  |
| 圖3-3、地下水背景砷濃度潛勢範圍及來源判定流程架構.....                            | 3-6  |
| 圖3-4、引灌自然富砷環境地下水之水田土壤影響地圖.....                             | 3-7  |
| 圖3-5、土壤砷污染判定及處理原則.....                                     | 3-8  |
| 圖4-1、本計畫研究流程與架構圖.....                                      | 4-2  |
| 圖4-2、濁水溪沖積扇地下水監測井及民井位置分布圖.....                             | 4-3  |
| 圖4-3、資料前處理流程圖.....                                         | 4-5  |
| 圖4-4、動態因子分析之(a)一般趨勢、(b)季節性變化、(c)雜訊.....                    | 4-9  |
| 圖4-5、隨機森林建模之流程.....                                        | 4-11 |
| 圖4-6、倒傳遞神經網路架構圖.....                                       | 4-12 |
| 圖4-7、模型交叉驗證示意圖.....                                        | 4-13 |
| 圖5-1、彰化縣與雲林縣平均砷濃度分布圖.....                                  | 5-1  |
| 圖5-2、彰化縣與雲林縣平均砷濃度長條圖.....                                  | 5-3  |
| 圖5-3、彰化縣與雲林縣砷濃度盒鬚圖.....                                    | 5-3  |
| 圖5-4、彰化縣歷年砷濃度隨時間之分布圖.....                                  | 5-4  |
| 圖5-5、雲林縣歷年砷濃度隨時間之分布圖.....                                  | 5-4  |
| 圖5-6、馬達型式統計長條圖.....                                        | 5-7  |
| 圖5-7、馬達馬力統計長方圖.....                                        | 5-8  |
| 圖5-8、井深及井徑資料來源統計長條圖.....                                   | 5-9  |
| 圖5-9、井深統計直方圖.....                                          | 5-10 |
| 圖5-10、井徑統計直方圖.....                                         | 5-11 |
| 圖5-11、電表型式與用水型態文字雲視覺化呈現圖.....                              | 5-12 |
| 圖5-12、目標監測井砷濃度之直方圖及 Q-Q plot 圖.....                        | 5-14 |
| 圖5-12、目標監測井砷濃度之直方圖及 Q-Q plot 圖(續1).....                    | 5-15 |
| 圖5-12、目標監測井砷濃度之直方圖及 Q-Q plot 圖(續2).....                    | 5-16 |
| 圖5-13、目標監測井正規化砷濃度移動迴歸模型之 (a)整體趨勢、(b)季節性變化、(c)雜訊(人為抽水)..... | 5-17 |
| 圖5-14、雲林縣褒忠(2)雨量站歷年平均雨量.....                               | 5-18 |
| 圖5-15、雲林縣虎尾(1)地下水站歷年平均地下水位.....                            | 5-18 |
| 圖5-16、彰化縣及雲林縣歷年水稻總產量.....                                  | 5-18 |
| 圖5-17、目標監測井周遭水井最佳影響距離與監測井基本資料散布圖.....                      | 5-24 |
| 圖5-18、彰化縣目標監測井周遭影響水井之總用電量趨勢圖.....                          | 5-25 |
| 圖5-19、雲林縣目標監測井周遭影響水井之總用電量趨勢圖.....                          | 5-25 |
| 圖5-20、彰化縣及雲林縣目標監測井周遭影響水井之各季總用電量.....                       | 5-25 |
| 圖5-21、彰化縣東興國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖.....                         | 5-26 |
| 圖5-22、彰化縣大村國中監測井砷濃度之動態因子分析成果圖.....                         | 5-26 |
| 圖5-23、彰化縣新寶國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖.....                         | 5-27 |
| 圖5-24、彰化縣華龍國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖.....                         | 5-27 |
| 圖5-25、彰化縣溪湖國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖.....                         | 5-27 |



建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| 圖5-26、雲林縣台西國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖.....     | 5-28 |
| 圖5-27、雲林縣文光國小湖口分校監測井砷濃度之動態因子分析成果圖..... | 5-28 |
| 圖5-28、雲林縣橋頭國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖.....     | 5-28 |
| 圖5-29、雲林縣大同國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖.....     | 5-29 |





## 表次

|                                         |      |
|-----------------------------------------|------|
| 表4-1、本計畫已初步完成收集預測模型之各項變數資料.....         | 4-4  |
| 表4-2、本計畫工作進度甘特圖.....                    | 4-14 |
| 表5-1、目標監測井砷濃度之常態分布檢定結果.....             | 5-13 |
| 表5-2、目標監測井之動態因子分析最佳結果及基本資料彙整表.....      | 5-19 |
| 表5-3、東興國小目標監測井最佳影響水井及距離名單.....          | 5-19 |
| 表5-4、大村國中目標監測井最佳影響水井及距離名單.....          | 5-20 |
| 表5-5、新寶國小目標監測井最佳影響水井及距離名單.....          | 5-20 |
| 表5-6、華龍國小目標監測井最佳影響水井及距離名單.....          | 5-21 |
| 表5-7、溪湖國小目標監測井最佳影響水井及距離名單.....          | 5-21 |
| 表5-8、台西國小目標監測井最佳影響水井及距離名單.....          | 5-21 |
| 表5-9、文光國小湖口分校目標監測井最佳影響水井及距離名單.....      | 5-22 |
| 表5-10、橋頭國小目標監測井最佳影響水井及距離名單.....         | 5-22 |
| 表5-11、大同國小目標監測井最佳影響水井及距離名單.....         | 5-23 |
| 表5-12、目標監測井基本資料與最佳影響電表資訊彙整表.....        | 5-23 |
| 表5-13、目標監測井基本資料與最佳影響電表資訊相關性分析.....      | 5-24 |
| 表5-14、變化跳動大之目標監測井基本資料.....              | 5-32 |
| 表5-15、變化跳動小且偶有超標之目標監測井基本資料.....         | 5-32 |
| 表5-16、變化跳動小且大部分未超標之目標監測井基本資料.....       | 5-32 |
| 表5-17、台西國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果.....    | 5-33 |
| 表5-18、東興國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果.....    | 5-33 |
| 表5-19、新寶國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果.....    | 5-34 |
| 表5-20、大村國中預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果.....    | 5-34 |
| 表5-21、文光國小湖口分校預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法結果..... | 5-35 |
| 表5-22、橋頭國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果.....    | 5-35 |
| 表5-23、大同國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果.....    | 5-35 |
| 表5-24、華龍國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果.....    | 5-36 |
| 表5-25、溪湖國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果.....    | 5-36 |



## 第一章 前言

近50年來，地下水砷污染問題已受到國際間高度關注，其主要影響地下水用水安全、農業灌溉與作物生長、人體健康危害等面向，而影響地下水砷濃度釋出過程與分布變化主要受到水文地質條件、生物地質化學反應、人為活動等因素的影響。臺灣地下水富砷問題由來已久，地下水富砷問題屬自然沉積環境還原反應伴隨產生之現象，並與地質沉積年代、質地、氧化還原條件等因素有關，富砷之鐵/錳氧化物為地層中砷的主要富集來源。

臺灣西南部平原地區普遍且大量抽取地下水做為農業用途，已造成砷濃度累積於農地土壤。由於地下水砷釋出機制主要受到氧化還原條件影響，而自然條件之降雨入滲、河川補注，及人為活動之抽取地下水皆可能改變區域地下水氧化還原條件，目前雲林彰化地區地下水水井數量高達25萬口以上，農業灌溉期間的抽水致使地下水水位下降，且抽水過程導致地表氧氣進入淺層地下水，進而影響砷釋出至地下水之速率，因此，本計畫研究目的為探討抽用地下水造成砷濃度變化程度，建立地下水砷濃度變化預測模型，以強化水資源使用與管理之平衡關係。

綜上所述，本計畫研究動機包括(1) 探討抽用地下水造成砷濃度變化程度，以強化水資源使用與管理之平衡關係；(2) 氣候變遷導致滯旱不均，未來地下水資源調配需考量水量與水質的交互影響。其研究動機詳細說明如下所述：

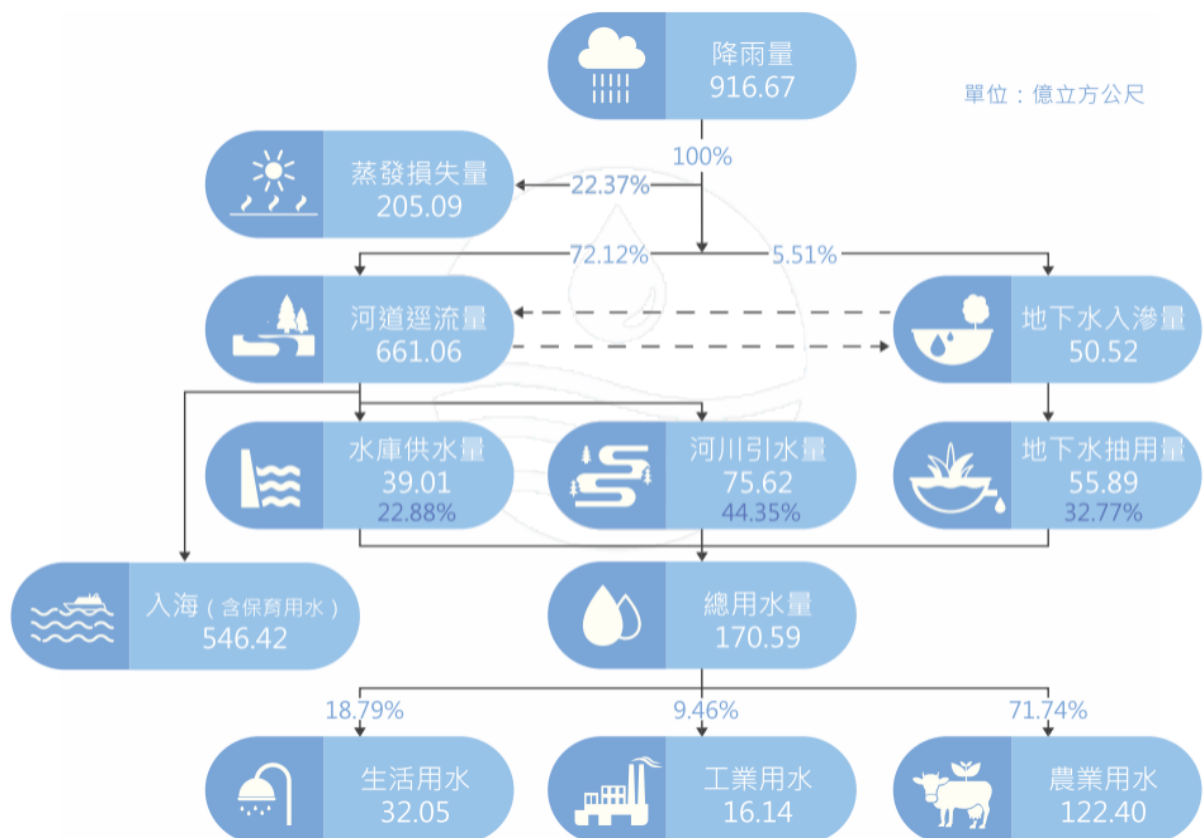
### 一、探討抽用地下水造成砷濃度變化程度，以強化水資源使用與管理之平衡關係

依據經濟部水利署中區水資源局(2007)研究顯示濁水溪沖積扇地下水總用水量為地下水佔10.1億噸/年(28%)，農業用水約佔6.6億噸/年(灌溉用水3.75億噸/年，養殖用水2.52億噸/年，禽畜用水0.36億噸/年)、生活用水2.04億噸/年、工業用水1.43億噸/年，顯示濁水溪沖積扇灌溉用水為地下水主要使用標的。行政院環境保護署(2019)曾建立濁水溪沖積扇之地下水砷潛勢範圍，比對經濟部水利署(2019)調查之民井基本資料與空間分布，可發現高達約3,000口之農業水井位於高潛勢範圍內(即地下水砷濃度超過污染監測標準之機率大於75%)，以往大多關注抽用富砷地下水造成的砷濃度流布與累積，倘若大量抽取地下水將造成砷濃度自地層中加速釋出至地下水，將使作物安全與人體健康暴露於更嚴重的威脅，爰此，實有釐清豐枯水期水文條件改變與人為抽水對於地下水砷濃度變化影響之必要。



## 二、氣候變遷導致滯旱不均，未來地下水資源調配需考量水量與水質的交互影響

臺灣雖然降雨量豐沛，然因地狹人稠、河川水流湍急，導致大多數水資源流失，依據經濟部水利署(2018)水利年報統計資料(圖6)，顯示臺灣近十年生活用水量約32.05億噸(占總用水量18.79%)、工業用水量約16.14億噸(占總用水量9.46%)，若總用水量以170.59億噸推估，農業用水量約122.40億噸(占總用水量71.74%)，說明農業發展所需用水為臺灣用水量之大宗。近年來臺灣豐枯水期之降雨分佈明顯改變，使地表水的調度壓力甚遽，而地下水資源常於地表水資源不敷使用時，做為補充或調度的重要水源，此外，以濁水溪沖積扇而言，受到灌溉水源不足而辦理休耕可能造成糧食減產與自給率降低等問題，而豐枯水期的水文條件與人為抽水行為可能造成地下水砷濃度增加或降低，因此，建立地下水砷濃度預測模型將有助於枯水期地表水與地下水調度時之參考依據。



資料來源：經濟部水利署，民國107年水利年報(2018)。

圖1-1、臺灣近十年(2009~2018年)水資源蘊藏量及用水量統計圖



## 第二章 研究目的

本計畫研究目的為探討抽用地下水造成砷濃度變化程度，建立地下水砷濃度變化預測模型，以強化水資源使用與管理之平衡關係，其重要性及研究目的如圖2-1所示，詳細說明如下所述：

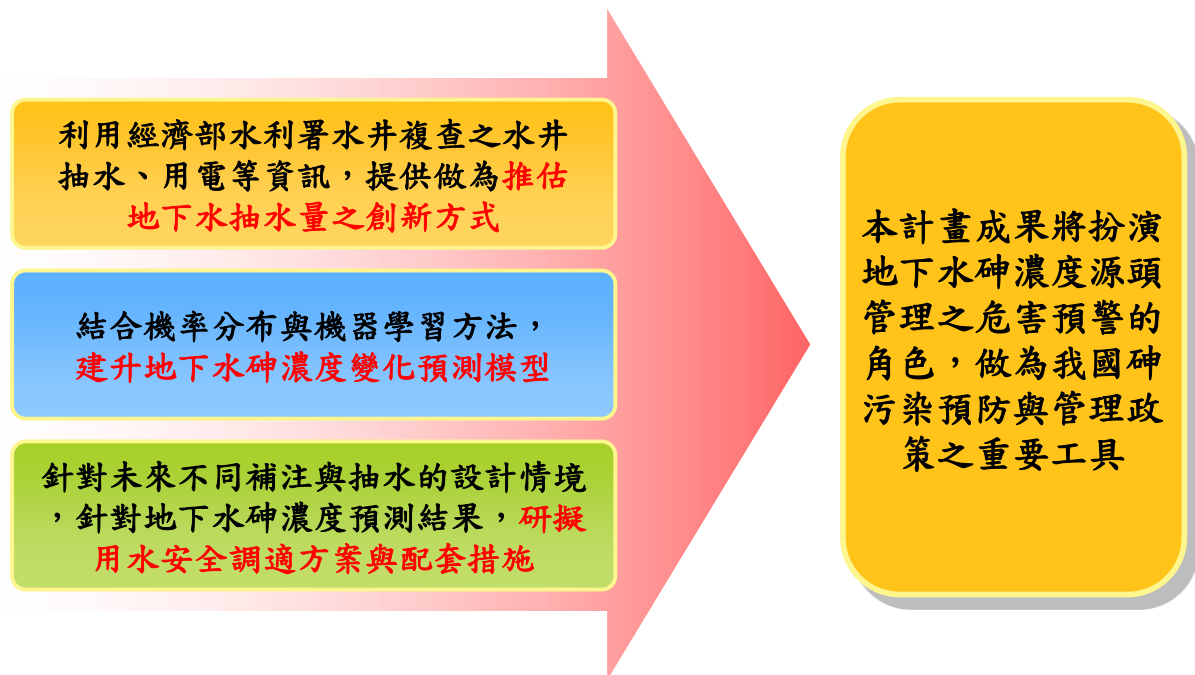


圖2-1、本計畫研究目的及重要性

### 一、推估地下水抽水量創新方式

回顧國際間探討地下水砷濃度變化及預測模型的諸多文獻，可發現幾乎無法有效評估人為抽水的影響，大多著重於整個集水區的水位變化可能造成的氧化還原條件改變、乃至砷由地層釋出速率改變之研究，而本計畫為利用雲林縣與彰化縣水井複查工作的水井資訊，進而查詢/申請台電用電資料，再透過抽水-用電比例(以下簡稱水電比)換算各口水井逐月之水量，此方法不僅為國際首創，更可對應每口水井所在地號之農地資訊，提升用水安全管理與農地污染評估之細緻程度。

### 二、提升地下水砷濃度預測準確度

依據經濟部水利署(2019)統計彰化縣與雲林縣申報納管之水井數量分



別為153,659與162,124口，其中以農業水井為最多數，分別高達120,198口(佔總申報水井之78.2%)與152,176口(佔總申報水井之93.9%)，目前已掌握各水井基本資訊，然而由於大多數農業水井並未裝設流量計量設備，故本計畫採用各水井用電量換算抽水量，以做為本計畫建立地下水砷濃度預測模型之重要數據。由於抽水量係由用電量推估，可能存在不可忽略的推估誤差，因此本計畫擬採蒙地卡羅(Monte Carlo Simulation)法進行不確定性分析，再者，由於降雨量、河川流量、抽水量、地下水砷濃度為隨時間變化之動態資料，且資料量龐大，因此本計畫擬採用線性迴歸(Linear Regression, LR)、隨機森林(Random Forest, RF)、支持向量機(Support vector machine, SVM)、人工神經網路(Artificial Neural Networks, ANN)等機器學習、深度學習演算法，建立地下水砷濃度預測模型，並以部分歷史資料做為模型驗證資料，以提升預測的精準度與精確度。

### 三、研擬地下水污染預防與管理方式

砷屬於全球性之地下水及土壤污染議題，尤以東南亞國家最為嚴重，其涵蓋層面包括公共衛生、地質化學、水文地質、土壤化學、農藝管理、食品安全，目前對於地下水砷濃度的釋出成因已有顯著研究成果，各國目前學術研究與政府政策大多著重於風險預防與風險管理，以源頭管理、傳輸途徑、受體預防之思維，本計畫將建立地下水砷濃度變化預測模型，於高濃度事件發生前提出預警，提醒用水單位減少使用地下水，為一有效的避險措施，而本計畫研究成果之預測技術預計可輸出並應用於面臨地下水砷污染的其他國家，針對本計畫建立模型之必要參數評估其他國家應用之可行性，並透過預測模型的交流與推廣，提升臺灣於地下水砷污染預防與管理的具體成果。





## 第三章 文獻探討

### 一、地下水砷污染之自然成因與人為影響

近50年來，地下水砷污染問題已受到國際間高度關注，其主要影響地下水用水安全、農業灌溉與作物生長、人體健康危害等面向，而影響地下水砷濃度釋出過程與分布變化主要受到水文地質條件、生物地質化學反應、人為活動等因素的影響，包括地形變化、地層沖積過程、沉積物特性、土壤性質、土地利用、地下水補注量和抽取量等(Ravenscroft et al., 2005; Nath et al., 2007; Mukherjee et al., 2011; Shamsudduha et al., 2015)。臺灣地下水富砷問題由來已久，且已成為國際間地下水砷污染相關研究之指標性案例，且對於臺灣西南地區用水安全影響最鉅，包括濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原等地區，依據前人研究成果(Liu et al., 2006; Lu et al., 2010; 2011; Wang et al., 2012; Guo et al., 2014)，顯示地下水富砷問題屬自然沉積環境還原反應伴隨產生之現象，並與地質沉積年代、質地、氧化還原條件等因素有關，富砷之鐵/錳氧化物為地層中砷的主要富集來源，Xiao et al. (2020)利用實驗室的土柱壓實試驗，說明大量抽取地下水而造成由黏土組成的阻水層產生壓密作用，將造成地層沉積物孔隙水中的砷濃度釋出於地下水中，隨著抽水過程壓力漸增，於還原環境中鐵氧化物表面之砷脫附作用造成水中砷濃度顯著上升。

因此，對於臺灣西南部平原地區普遍且大量抽取地下水做為農業用途，除了造成砷濃度進入農地並累積與土壤中，更可能導致地層砷濃度釋出速率與濃度上升更為顯著，依據經濟部水利署(2019)統計彰化縣與雲林縣申報納管之水井數量分別為153,659與162,124口，其中以農業水井為最多數，分別高達120,198(佔總申報水井之78.2%)與152,176口(佔總申報水井之93.9%)，因此，人為大量抽水行為造成之地下水砷濃度變化，實為刻不容緩的用水安全管理問題，而利用水文、地質、人為活動等相關變數，建立有效的地下水砷濃度預測模型，更可降低農地土壤、作物安全、人體健康於砷污染之危害風險。

### 二、地下水砷濃度變化的影響機制與預測方法

由於地下水砷釋出機制主要受到氧化還原條件影響，而自然條件之降雨入滲、河川補注，及人為活動之抽取地下水皆可能改變區域地下水氧化還原條件(Knappett et al., 2016; Schaefer et al., 2016; 2017)。依據行政院環境



## 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

保護署(以下簡稱環保署)辦理區域性監測井定期監測結果，以雲林縣台西國小及彰化縣新寶國小為例(圖3-1)，歷年地下水砷濃度呈現不同季節之上升與下降情形，Wang et al. (2011)針對雲林地區歷年地下水砷濃度於豐枯水期變化之情形，利用統計方法之動態因子分析探討降雨量與河川補注對於砷濃度變化的影響程度，其結果顯示豐水期降雨量與河川補注量影響而使地下水水位上升，同時亦造成豐水期地下水砷濃度顯著高於枯水期。Rodríguez et al. (2004) 利用降雨量與地下水砷濃度之關係，歸納降雨導致地下水中溶氧增加，並使當地地層所含之含砷硫化礦物產生溶解反應，此結果對照臺灣歷年研究成果，說明不同地質礦物組成條件之降雨補注對於地下水砷濃度造成不同的改變。

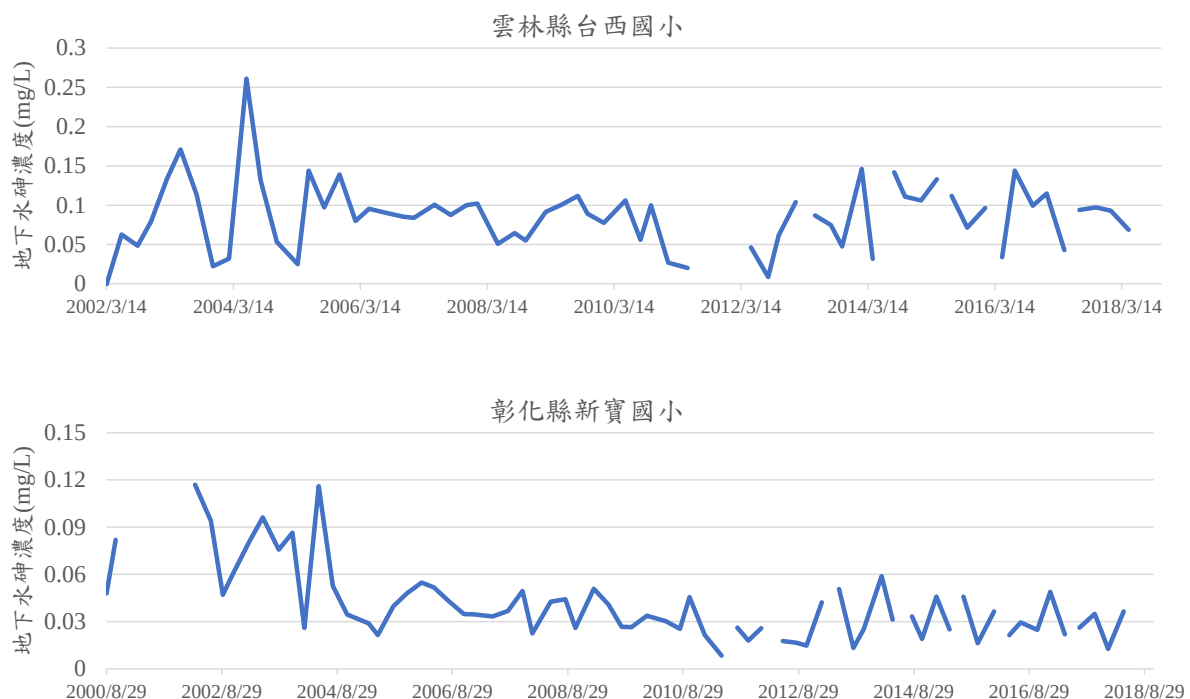


圖3-1、監測井歷年地下水砷濃度(以雲林縣台西國小與彰化縣新寶國小為例)

Zhang et al. (2020) 利用兩年期間的水位觀測資料與水質監測數據，指出農業灌溉期間的抽水致使地下水水位下降，且抽水過程導致地表氧氣進入淺層地下水，而較氧化的狀態使砷濃度不易釋出至地下水中，此研究也說明人為的抽取地下水為地下水砷濃度隨季節變化的關鍵機制。評析地下水砷濃度變化的關鍵因子，將有助於推估不同自然與人為條件下造成的地下水砷濃度變化，Frederick et al. (2016)針對美國不同州與不同平原之水文氣象與地下水水質數據，應用分類迴歸樹方法(classification and regression





tree, CART) 以建立地下水砷濃度預測模型。Chakraborty et al. (2020) 針對恆河三角洲之水文地質與人為因素造成地下水砷濃度超過飲用水標準之機率分布，應用統計與機器學習方法建立高解析度且跨國界的預測模型，可有效解決有限的地下水砷濃度監測資料限制砷濃度分布推估的問題。

### 三、地下水砷濃度潛勢分布地圖及來源判定流程

地下水污染管制標準中重金屬項目「砷」因臺灣地質特性緣故，除工業運作等人為因素外，地下水砷濃度主要來源多為背景自然地質釋出所致，故須依照地下水污染管制標準(環署土字第1020109478號)公告之附件「地下水背景砷濃度潛勢範圍及來源判定流程」來判斷，而此附件第壹部分「砷濃度潛勢範圍劃定」第四條即明確指出，地下水砷潛勢區涵蓋範圍應依地下水定期監測結果而調整之，而為滾動式調整地下水砷濃度潛勢範圍，行政院環境保護署(2019)曾更新至民國108年地下水砷濃度潛勢範圍，如圖3-2所示。

地下水砷濃度潛勢範圍繪製原則以較保守之方式進行砷濃度潛勢區域推估，以第一類地下水污染監測標準(0.025 mg/L)為門檻值，且不考慮地下水分層，當地下水歷年平均砷濃度超過門檻值時，即判定此監測點屬地下水砷污染潛勢區，並將地下水超過門檻值之發生機率超過75%的鄉鎮及村里等資料統整後匯出，經以場置性監測井、民井及其他計畫調查數據進行資料驗證，檢視、調整及劃定具超標潛勢之村里。

而因外來因素所致之砷來源判別及地下水砷污染判定流程架構，如圖3-3所示，地下水砷污染來源判定流程主要內容包括蒐集污染場址之水文地質資料、人為活動情況，規劃地下水砷污染調查範圍，進而彙整周邊既設井歷年水位變化、水質檢測資料、地層沉積物特性，初步判斷非外來因素所致之可能性，並進行污染場址現勘與居民訪談，判斷周邊人為污染來源之可能性。

### 四、引灌富砷地下水農地土壤影響地圖及污染判定處理原則

抽用富砷地下水進行農業灌溉為臺灣西南沿海地區普遍行為，進而造成農地土壤砷濃度累積、甚而超標情形發生。行政院環境保護署(2018)完成引灌自然環境富砷地下水之水田土壤影響地圖(圖3-4)，結果顯示前述區域因地下水還原態之特性，砷、鐵、錳濃度均有偏高情形，經抽水引灌後進而導致砷累積於土壤中，該影響地圖考量農地土壤砷濃度累積之可能成因，

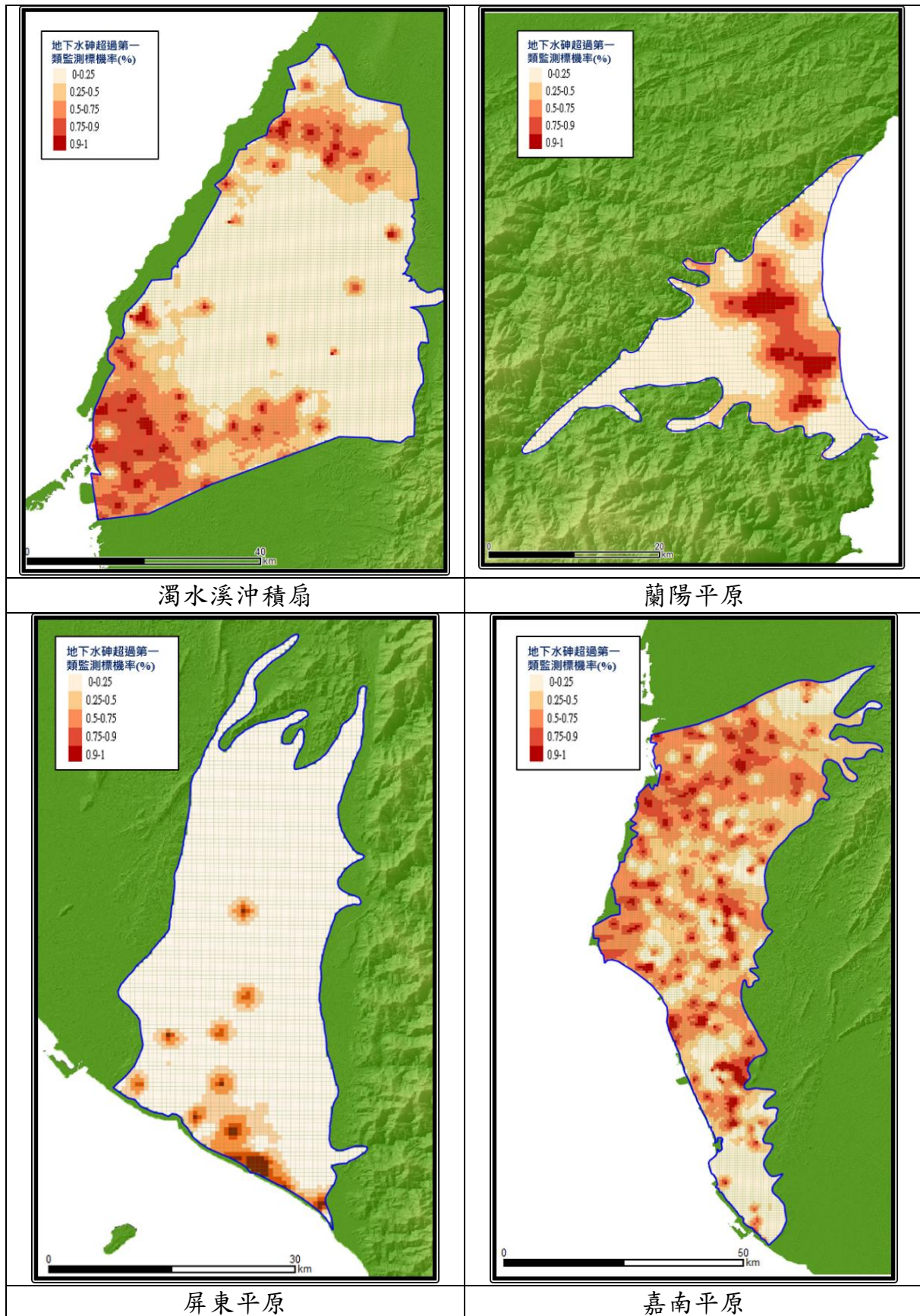


## 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

選定地下水砷超標機率、具有水井之水田數量比例、水稻種植期別、土壤酸鹼值做為影響因子，並設定級距、分數與權重，完成引灌自然環境富砷地下水之水田土壤影響地圖之建置，將農地土壤砷潛勢分為高、中、低三級，以歷年與該計畫土壤砷含量調查數據進行驗證，準確率均達80%以上，可反映國內農地砷問題發生區域。

富砷水田土壤影響地圖係以空間推估及較保守方式繪製，劃定之高潛勢區域係指可能發生水田土壤砷問題之區域，為一發生機率之概念。期藉由提供清楚、明白、直觀、易懂的圖像，使未來參考與使用之主管機關與人員皆可清楚瞭解國內環境現況，並能於此基礎上，做為依土污法第12條第9項規定辦理跨單位協商會議之論述基礎，進一步研擬與推動相關管理政策。

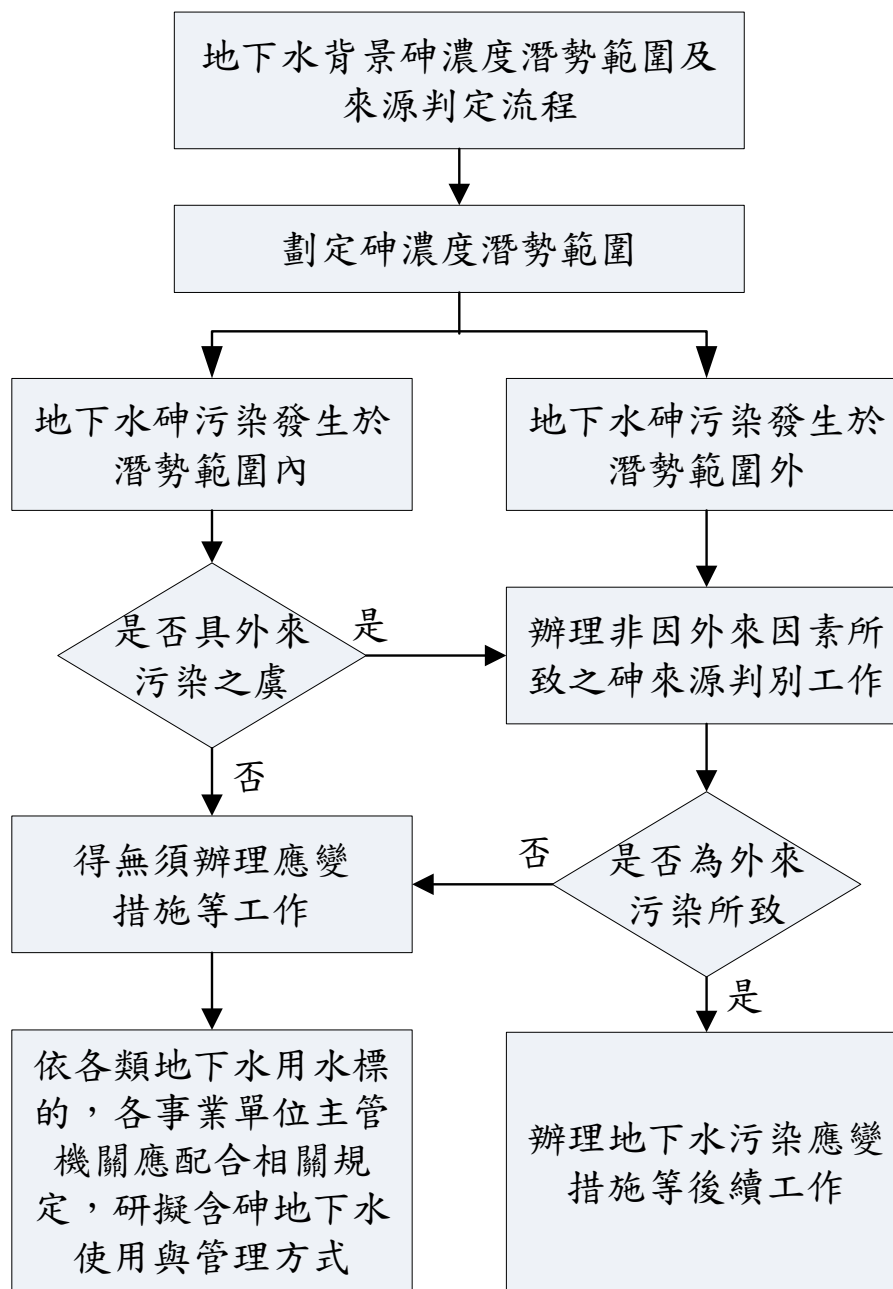
因應天然成因之富砷地下水與農地土壤富砷現象間的關聯性，環保署於民國107年發布土壤砷污染判定及處理原則，目的為使直轄市、縣(市)主管機關，依土壤及地下水污染整治法第12條第9項規定，辦理農業用地因自然環境存在經引灌致土壤砷濃度達污染管制標準之相關工作有所依循，發現農地土壤含砷量達土壤污染監測或管制標準，依該架構規劃污染程度與範圍調查工作，釐清評估受人為污染之可能性後，針對外來污染之疑慮、引灌地下水與否及是否位於潛勢範圍進行判識，該原則如圖3-5所示。



資料來源：行政院環境保護署，全國地下水水質巨量分析與管理推動計畫 (2019)。

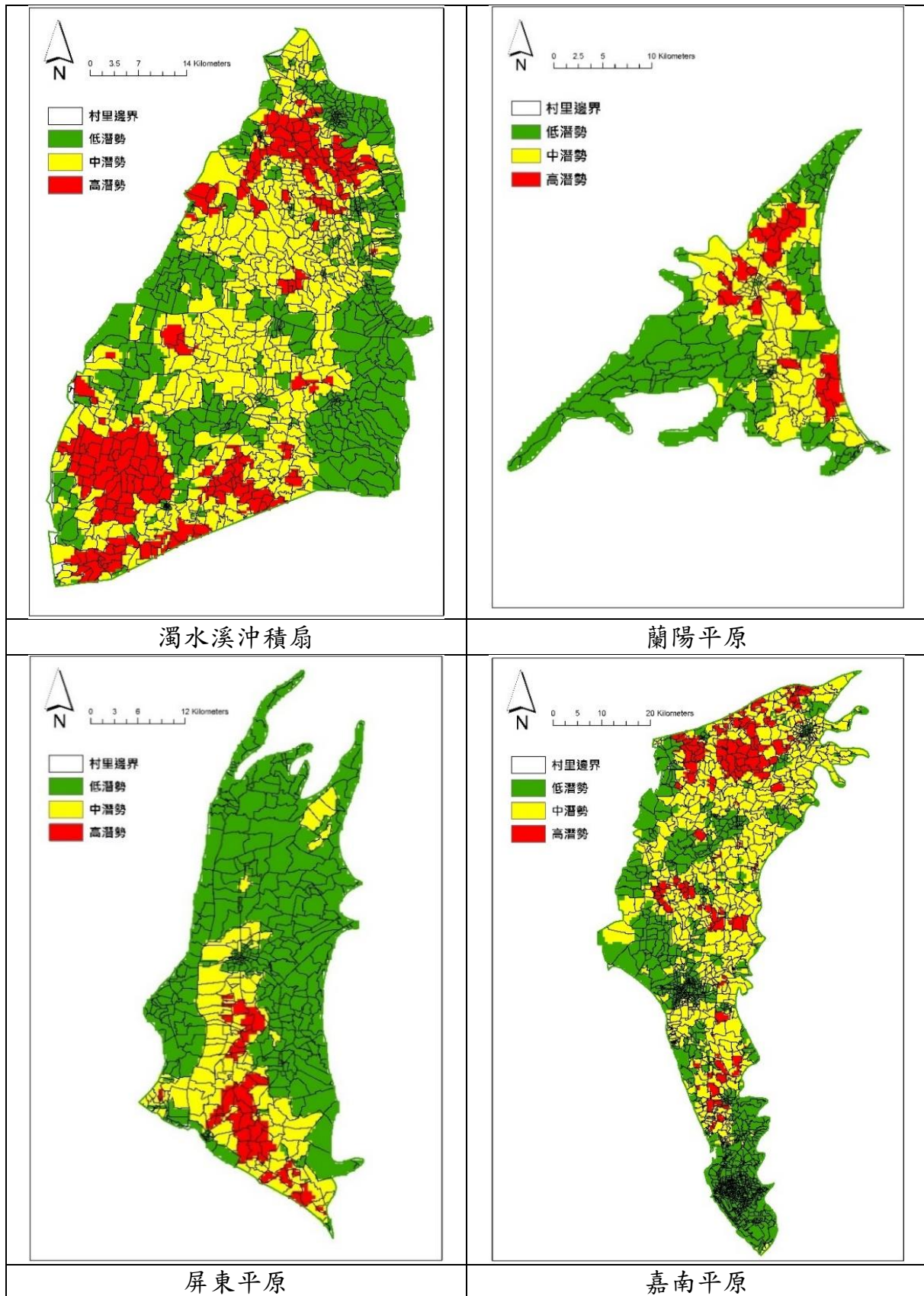
圖3-2、地下水砷濃度潛勢分布地圖(行政院環境保護署，2019)





資料來源：行政院環境保護署，地下水有害物質環境傳輸調查及管制標準檢討計畫(第二期)(2014)。

圖3-3、地下水背景砷濃度潛勢範圍及來源判定流程架構

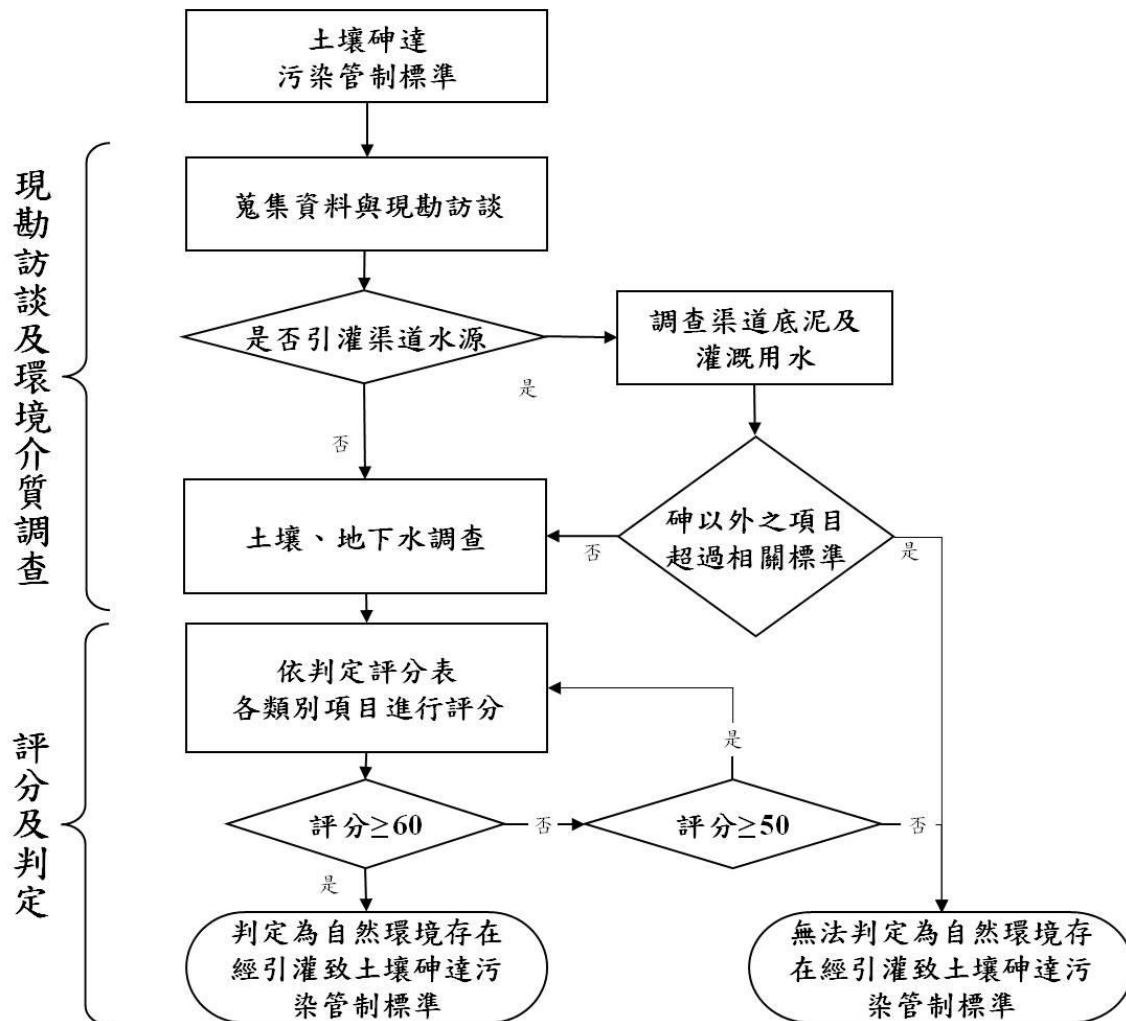


資料來源：行政院環境保護署，自然背景富砷地下水影響之農地土壤調查及整治技術評估計畫 (2016)。

圖3-4、引灌自然富砷環境地下水之水田土壤影響地圖



# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案



資料來源：行政院環境保護署，自然背景富砷地下水影響之農地土壤及地下水砷移除技術試驗與發展計畫 (2018)。

圖3-5、土壤砷污染判定及處理原則





## 第四章 研究方法與過程

### 一、研究流程

本計畫研究流程如圖4-1所示，在選定研究區域後，針對研究區域辦理時序及空間資料蒐集及前處理工作，並建立動態因子分析模型，找出影響濁水溪沖積扇之區域性監測井地下水砷濃度變化之關鍵因子，再利用多項式線性迴歸分析及蒙地卡羅演算法等方式，將抽水井用電量轉換成抽水量，找出濁水溪沖積扇之關鍵抽水井名單，接著將不同特徵與名單進行模型設計與測試，建立濁水溪沖積扇之地下水砷濃度變化預測模型，並藉由不同的降雨機率、補注條件、及農業灌溉抽水量等情境分析，推估未來地下水砷濃度變化情形。此外，本計畫將研擬環保、水利、農業單位之富砷地下水影響農地之管理策略，並依據情境分析結果，研擬引灌富砷地下水之調適與因應方案。各項研究方法詳細說明如下所示。

### 二、研究區域

依據行政院環境保護署(2019)執行成果顯示地下水砷濃度潛勢範圍之村里數共計921個村里，其中位於濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原、蘭陽平原等4個地下水分區地下水砷濃度潛勢範圍之縣市，包括彰化縣94村里、雲林縣118村里、嘉義縣158村里、臺南市229村里、高雄市131村里、屏東縣50村里、宜蘭縣115村里等共計895個村里，占全臺地下水砷濃度潛勢範圍之97.18%，顯示此4個地下水分區地下水砷濃度確實位於高潛勢範圍內。

濁水溪沖積扇位於臺灣西南部平原地區，包含彰化縣南半部及雲林縣北半部，由於彰化縣與雲林縣之稻作產量與農業灌溉水井數量為各縣市之冠，為防範地下水砷濃度過高，導致農地土壤砷累積進而影響作物生長安全與品質，因此，本計畫優先以濁水溪沖積扇做為地下水砷濃度變化預測模型建立之研究區域，濁水溪沖積扇地下水監測井及民井位置分布如圖4-2所示。



# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

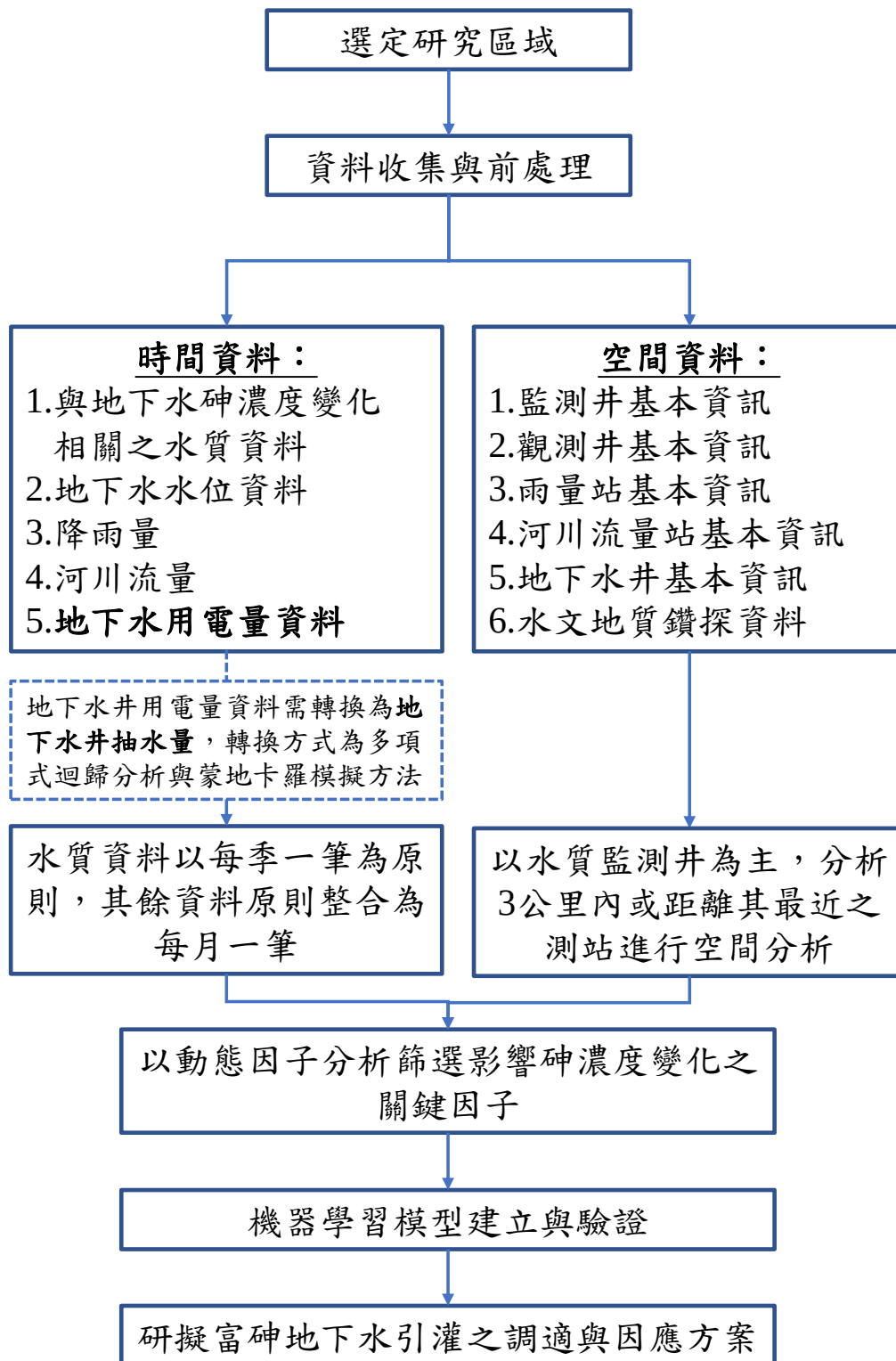


圖4-1、本計畫研究流程與架構圖

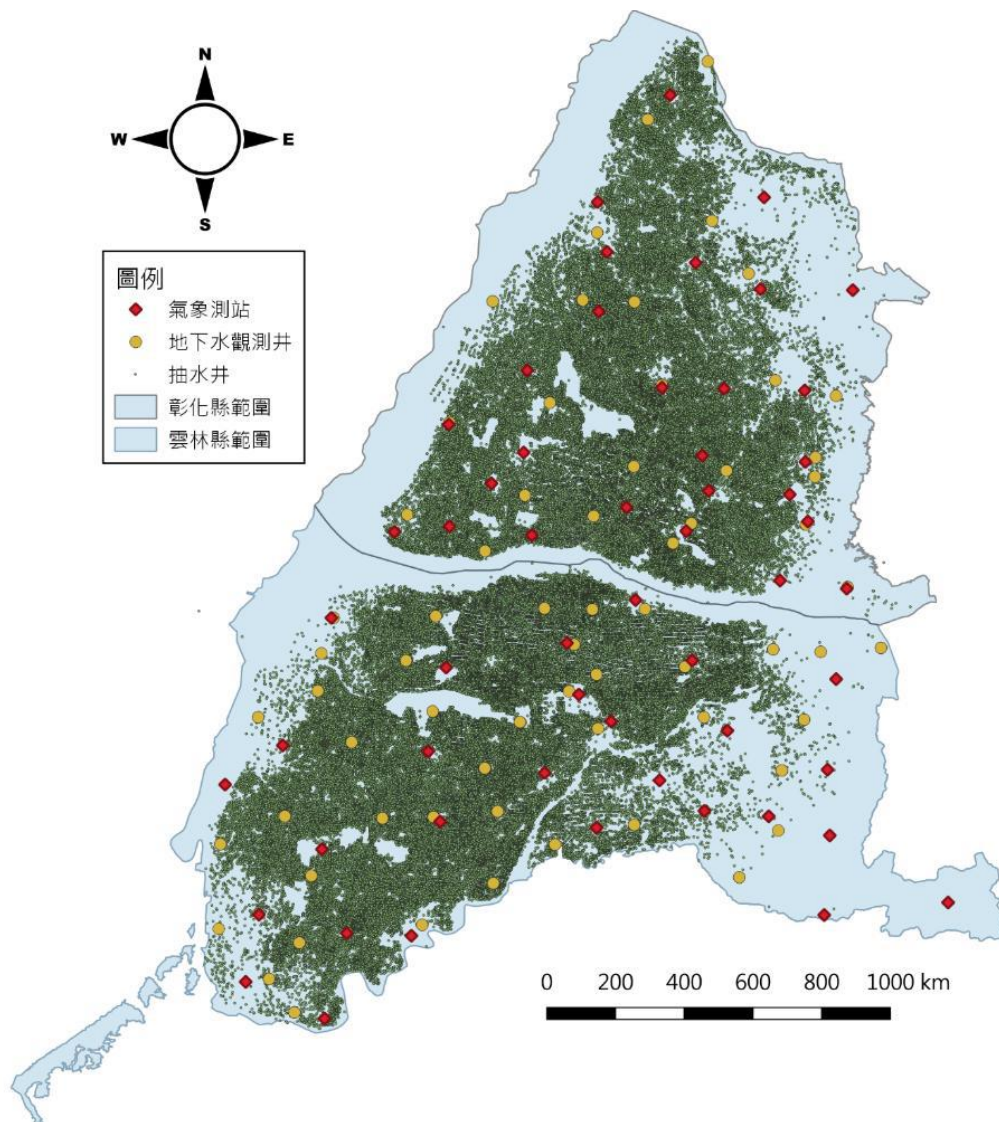


圖4-2、濁水溪沖積扇地下水監測井及民井位置分布圖

### 三、資料蒐集

砷污染屬於自然環境地質釋出之物質，其過程為複雜且非立即性之地質化學反應，因此本計畫收集地下水水質、水位、地下水井用電量、降雨量、及河川流量等可能影響地下水砷濃度變化之監測資料，建立地下水砷濃度於豐枯水期變化之預測模型，本計畫所涉之各項資料皆已由各主管機關持續收錄，本計畫已收集如表4-1，其資料時間跨距久遠，足以使本計畫建立高度可信之預測模型，然而由表4-1顯示各資料時間尺度不一，因此，需藉由適當的資料前處理方式，以利後續進行統計分析及機器學習模型建立之使用，資料前處理原則為資料清理(data cleaning)、資料整合(data integration)、資料選擇(data selection)、資料轉換(data transformation)等步驟。



表4-1、本計畫已初步完成收集預測模型之各項變數資料

| 資料                   | 尺度            | 主管機關     |
|----------------------|---------------|----------|
| 監測井水質資料              | 2002~2019，每季  | 行政院環境保護署 |
| 觀測井水位資料              | 2001~2019，每時  | 經濟部水利署   |
| 降雨量                  | 2000~2019，每時  | 交通部氣象局   |
| 河川流量                 | 2002~2019，每時  | 經濟部水利署   |
| 地下水水井用電量             | 2007~2019，每雙月 | 臺灣電力公司   |
| 監測井基本資訊(位置、深度)       | 每口監測井         | 行政院環境保護署 |
| 地下水水井基本資訊<br>(位置、深度) | 每口水井          | 經濟部水利署   |
| 觀測井基本資訊(位置、深度)       | 每口水井          | 經濟部水利署   |
| 雨量站基本資料(位置)          | 每測站           | 交通部氣象局   |
| 河川流量站基本資料(位置)        | 每測站           | 經濟部水利署   |
| 水文地質資料(位置)           | 每鑽探點          | 經濟部地調所   |

#### 四、資料前處理

本計畫處理各類資料之前處理流程如圖4-3所示，在時間資料處理方面，本計畫為使每一資料時間尺度一致，首先將時間區段定義為2007~2018年共計12年為主要分析時間區段，再將各資料整合為每月一筆，藉由總量或平均等統計量做為各監測資料之每月數值代表，避免空間尺度不一而造成資料無法做為後續機器學習應用；而在空間資料處理方面，由於各資料蒐集之測站位置不同，本計畫將以水質監測井為主，針對監測井周遭3公里內資料，分區建立模型並探討不同監測井地下水砷濃度變化之差異，並採用距離其最近之觀測井水位、抽水井用電量、河川流量站流量、雨量站降雨量等前 K 個月資料做為該口監測井之特徵因子，或是常見之地理統計補值方式(克里金插值法)進行資料補遺，本計畫採用之兩種空間資料補遺方法說明如下，此外，本計畫地下水井用電量資料需轉換為地下水井抽水量，其轉換方式為多項式迴歸分析方法說明如下。



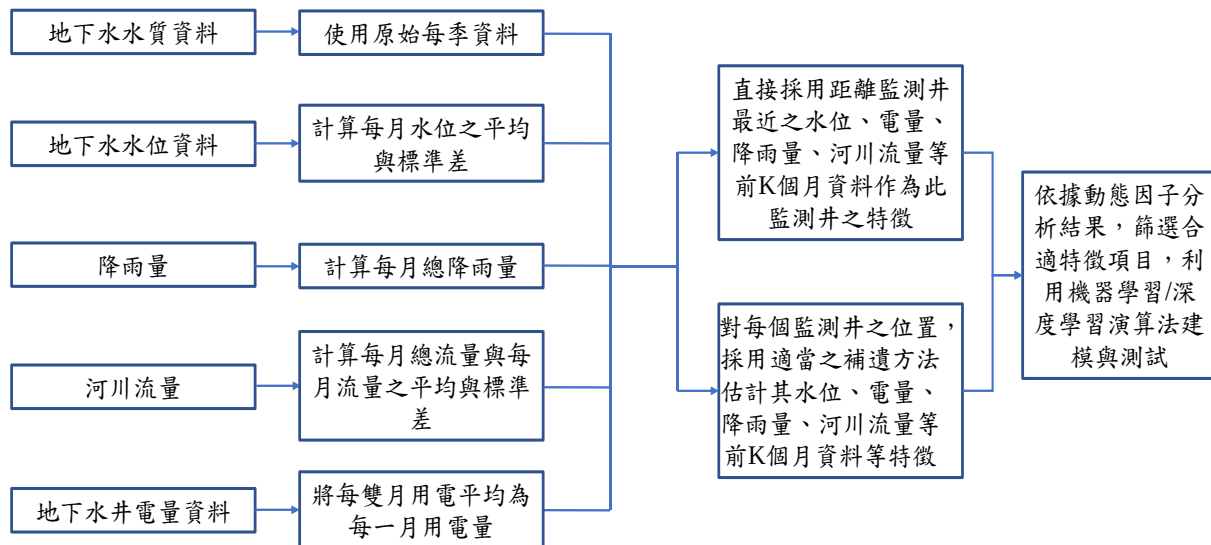


圖4-3、資料前處理流程圖

### (一) 空間資料轉換：克里金插值法 (Kriging method)

克里金法是一種地理統計插值方法，克里金模型假定過程遵循一個總體平均值(或指定趨勢)，並且各種變化均圍繞該平均值。較大的偏差將向平均值拉回，因此值不會偏差過大。但是，經驗貝葉斯克里金插值 (Empirical Bayesian Kriging, EBK) 不會呈現出趨於總體平均值的趨勢，因此較大偏差變大變小的可能性相同。

### (二) 地下水井電量-抽水量轉換：多項式線性迴歸分析

據水文學非侷限含水層之多井抽水水位洩降公式，顯示地下水位變化與抽水量及抽水距離有正向關係，經濟部水利署近年逐步辦理雲林縣及彰化縣地下水水井申報納管計畫，已逐步完備農業、工業、民生等不同產業類別之抽水井基本資料，包括座標、用途、電表號等資訊，然而目前尚未建置專業量水設備，故尚無抽水井在不同時間點之實際用水資料。上述非侷限含水層之多井抽水水位洩降公式說明如下。

$$h_0^2 - h^2 = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\pi K} \ln \frac{r_{0i}}{r_i}$$

式中  $h_0$  為原地下水位高度、 $h$  為多井同時抽水影響下之地下水位高



度、 $Q$ 為抽水量、 $K$ 為透水係數。此外，由水井抽水量經驗公式，推算單一地下水觀測井之水位變化如下。

$$\text{觀測井水位變化} \propto \text{水井用電量}^{\times \ln\left(\frac{c}{r^2}\right)}$$

其中  $c = r_{max}^2 \times e$ ， $r_{max}$  為離觀測井最遠之抽水井距離。然而，臺灣地下水水井抽水絕大多數以抽水馬達為之，因此抽水量應與馬達用電量成正比，每口水井每單位用電可抽取之水量，受到馬達馬力、出水管徑、水深的影響而不同，行政院農業委員會(2013)調查研究結果顯示以此3項參數建立抽水量-用電量之線性迴歸關係式，其相關係數可達0.712之顯著正相關。此外，依據經濟部水利署(2017)研究成果，顯示彰化縣及雲林縣部分鄉鎮之農業灌溉水井，已採用井徑、馬力、井深、揚程、現場量測流量、實際用電度數等資料，建立不同鄉鎮及不同馬達型態水電比之經驗公式，意即得出各項係數(各項自變數之參數)，有關水電比之多變項迴歸分析計算公式說明如下。

$$\frac{V}{\Delta W} (m^3 / \text{度}) = (aP + bD_1 + cD_2 + dH_1 + eH_2)$$

式中  $V$  為抽水量、 $\Delta W$  為用電度數、 $P$  為馬力、 $D_1$  為井徑、 $D_2$  為出水管徑、 $H_1$  為井深、 $H_2$  為抽水揚程，而  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  及  $e$  為各項自變數之參數。

## 五、資料盤點情形

### (一) 監測井資料

濁水溪沖積扇之環保署區域性監測井共計41口，包括彰化縣20口、雲林縣18口、嘉義縣3口等，每口監測井資訊包括座標、深度、水質監測等，其中監測井皆位於第一含水層其井深大多在20公尺內。監測井水質資料的時間範圍為2002年至2019年，每季或每半年或每年一筆資料，本計畫除彙整地下水歷年砷濃度資料外，亦將彙整與地下水砷濃度相關之水質參數，包括總有機碳、鐵、錳、氧化還原電位、與酸鹼值等，以提升模型預測的完整性。

### (二) 觀測井資料

濁水溪沖積扇之水利署觀測井共計224口，包括南投縣7口、彰化縣





90口、嘉義縣11口、雲林縣116口，每口觀測井資訊包括座標、深度、含水層、水位監測資料、水質監測等，其中觀測井位於第一含水層共69口、第二含水層共87口、第三含水層共47口、第四含水層共17口、沒有分層共4口。觀測井水位資料的時間範圍為2001年至2019年，每小時一筆，水利署已將資料處理為月水位資料供其他單位使用。

### (三) 河川資料

濁水溪沖積扇之河川，自北而南有舊濁水溪、新虎尾溪、舊虎尾溪及北港溪等，其中具有流量資料河川共計31站，包括濁水溪19站、北港溪12站，每站基本資訊包括座標、河川名稱、流量監測資料等，河川流量資料的時間範圍為2002年至2019年，每小時一筆，水利署已將資料處理為月流量資料供其他單位使用。

### (四) 雨量資料

濁水溪沖積扇區域共計66個氣象測站，雲林與彰化地區分別為35與31個測站，每個測站資訊包含經緯度座標、設站與撤站日期、雨量等資料。雨量資料的時間範圍為2010年1月到2019年9月，每一小時一筆。因此，將採用累計雨量、未下雨天數等數據做為預測之特徵。為避免氣象測站與監測井距離過造成判斷之偏誤，將以監測井3公里內且距離最近氣象測站之雨量，做為該監測站之特徵。

### (五) 抽水井用電

濁水溪沖積扇區域之抽水井與觀測井數據涵蓋242,711口抽水井，每口抽水井資訊包含水井號、電錶號、位置座標、日期、用電量等資料、所屬政府、抽水馬達規格、電錶號以及是否為專用電表，其中用電量資料的時間範圍為2007年1月到2018年6月之單(雙)數月或每個月。由於非專用電錶之用電度數可能包含非抽水馬達的用電，因此，排除未標示為專用電錶之抽水井後剩172,572口抽水井。此外，一個電錶可能配到多口抽水井，換言之，一個電錶所記錄的用電度數是由多口抽水井用電抽水累計，為了使得每一抽水井對應一專用電錶，將座標位置進行了處理，其中一個專用電錶搭配一個抽水井的情況就繼承原本抽水井的座標位置，最後，總計專用電錶的數量為167,579個。為避免抽水井與監測井距離過造成判斷之偏誤，將以監測井3公里內且距離最近抽水井之用電量，做為該監測站之特徵。



## 六、研究執行方法

### (一) 常態分布檢定(Test for Normality)

由於本計畫砷濃度與用電量資料皆小於50筆(至多46筆資料)，故採用 Shapiro-Wilk 檢定來檢定樣本數在50個以下的常態性假設，Shapiro-Wilk 檢定(Shapiro and Wilk, 1965)是將數值經過排序後，用來檢定樣本是否來自常態分布，虛無假設  $X_1, X_2, \dots, X_n$  是來自常態分佈的樣本資料，Shapiro-Wilk test(W 統計量)的計算公式如下：

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a_i = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{\frac{1}{2}}}$$

$\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ :期望值集合

$\mathbf{V}$ :變異數集合

若計算結果  $W$  通過統計顯著( $p\text{-value} < 0.05$ )，則表示拒絕虛無假設，即樣本不符合常態分布，反之，若  $W$  未通過統計顯著( $p\text{-value} > 0.05$ )，則表示不拒絕虛無假設，即樣本符合常態分布。

### (二) 動態因子分析(Dynamic Factor Analysis)

動態因子分析屬於資料維度縮減之統計方法，其理論為假設推估變數(於本計畫為地下水砷濃度)為時間序列函數，且主要由數個一般趨勢(common trend)、解釋變數(explanatory variables)、截距(intercept)、及雜訊(noise)所組成，且前一時間之推估變數與下一時間之推估變數存在雜訊，其數學表示式如下。

$$S_n(t) = \sum_{m=1}^M \gamma_{m,n} \alpha_m(t) + \mu_n + \sum_{k=1}^K \beta_{k,n} x_k(t) + \varepsilon_n(t)$$

$$\alpha_m(t) = \alpha_m(t-1) + \eta_m(t)$$

其中  $S_n(t)$  為時間  $t$  之第  $n$  個推估變數； $\gamma_{m,n}(t)$  為因子負荷； $\alpha_m(t)$  為時間  $t$  之第  $m$  個一般趨勢； $\mu_n$  為第  $n$  個截距； $\beta_{k,n}$  為第  $k$  個解釋變數之迴歸係數； $x_k(t)$  為時間  $t$  之第  $k$  個解釋變數； $\eta_m(t), \varepsilon_n(t)$  為雜訊。



經過動態因子分析後，可將多口監測井之地下水砷濃度變化簡化為數個變化趨勢(圖4-4(a))，並可歸納豐枯水期季節性的水文條件對於砷濃度變化造成的影響(圖4-4(b))，及由人為抽水造成的雜訊(圖4-4(c))(Wang et al., 2011)，依此結果篩選必要且具代表性的變數與其空間點位，以做為下階段機器學習模型之訓練與驗證資料。

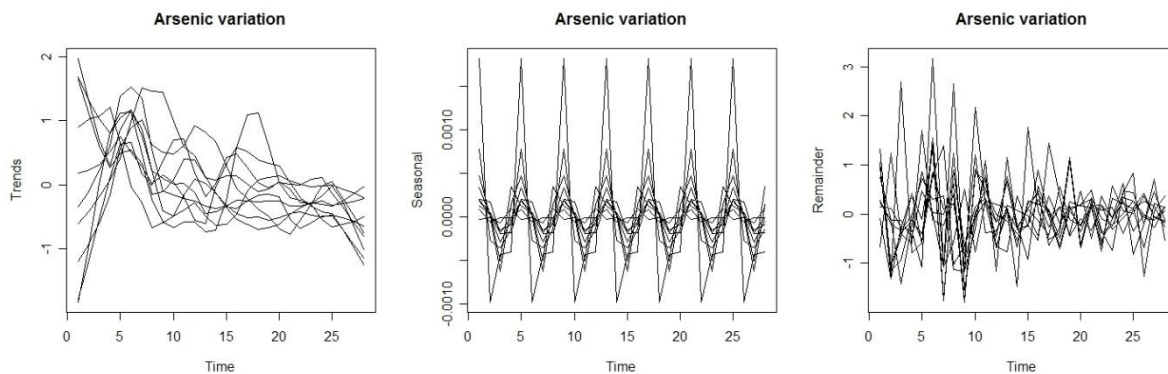


圖4-4、動態因子分析之(a)一般趨勢、(b)季節性變化、(c)雜訊

由於動態因子分析屬於廣義線性模型，而廣義線性模型可計算數個評估量值(配適統計值)，以協助評估模型配適資料的程度。在模型輸出結果可取得四項配適統計值，各項評估量值說明如下。

### 1. LOG Likelihood

概度函數(Likelihood Function)可估計觀測樣本(已提供所有可能的參數值)的機率，而對數概度(LOG Likelihood)只是概度函數的對數，此值為負2倍的對數概度，一般來說，偏好使用較小的值。

$$\text{LOG Likelihood} = -2\log(\text{likelihood})$$

### 2. AIC

Akaike (1973)所提出的 AIC 準則(Akaike Information Criterion, AIC)，一直是多數學者與統計軟體應用來選取模型的準則，其定義為：

$$AIC = -2\log(\text{likelihood}) + 2m$$



此處的 $m$ 為模型中參數的個數。若欲選取的模型為最佳，則必須使 AIC 值最小。AIC 的優點是具有有效性，也就是它會選擇具有最小 MSE (mean squared error) 分配的模型做為適配模型，但是卻容易有過度適配 (over-fitting) 的問題發生，這是因為相較於其他選模準則，AIC 的懲罰函數較小所致，因此，若樣本數增加，過度適配的問題就可以得到改善。

### 3. BIC

貝葉斯資訊準則 (Bayesian Information Criterion, BIC) 是用來修正 AIC 準則過度配適的問題，BIC 所選出之模視為正確模式的機率趨近於1，反之，也不會有過度適配的問題，原因是 BIC 的懲罰函數的係數為 $\log(N)$ ，一般都會大於 AIC 懲罰函數的係數2，故當樣本數多時，BIC 準則傾向於選擇較簡單的模式，其定義為：

$$BIC = -2 \log(\text{likelihood}) + \log(N) * m$$

其中， $N$ 表示有效樣本數， $m$ 為模型中參數的個數。

### 4. CAIC

Bozdogan (1987) 為了讓 AIC 更有一致性，提出 CAIC (Consistent Akaike Information Criterion, CAIC)，將 AIC 的懲罰項係數由一個比2更大的樣本數函數來替代。在樣本數較小或衡量變數較少時，AIC 指標通常有低估的情形出現，而 CAIC 則改善了這項缺點，其定義為：

$$CAIC = -2 \log(\text{likelihood}) + [1 + \log(N)] * m$$

其中， $N$ 表示有效樣本數， $m$ 為模型中參數的個數。

## (二) 機器學習模型之建立與驗證

本計畫利用前處理之特徵，於模型建立過程則將針對各類變數，依抽水量、降雨量、水力傳導係數、深度、河川流量等資料之順序，依序進行模型的測試與訓練，最終選定最適之模型做為情境模擬之基礎，並採用線性迴歸、隨機森林、支持向量機、人工神經網路等演算法進行地下水砷濃度變化預測模型之建置，說明如下。

### 1. 線性迴歸



線性迴歸是一種迴歸分析，它採用線性回歸方程模擬一個或多個自變量與因變量之間的關係。只有一個自變量的情況稱為簡單回歸，多個自變量的情況稱為多元回歸。許多工程問題涉及確定兩個或更多變量之間的相關性。

## 2. 隨機森林

隨機森林是一種集成方法，圖4-5為隨機森林建模之流程，首先使用原始訓練數據中的 Bootstrap 提取多個樣本，然後為每個樣本生成一顆未訓練好的樹。Bootstrap 從原始訓練數據中提取部分數據作為子集生成樹，然後將它們放回，直到所有樹生成。綜觀來說，隨機森林優勢包括(a)有效處理及填補缺失值，即使大量數據缺失仍然可維持高精確度、(b)有效的處理少量資料、(c)對於數據挖掘、檢測離群點和數據可視化非常有用、(d)訓練速度快，能處理高維度的資料，且可不需做特徵選取。

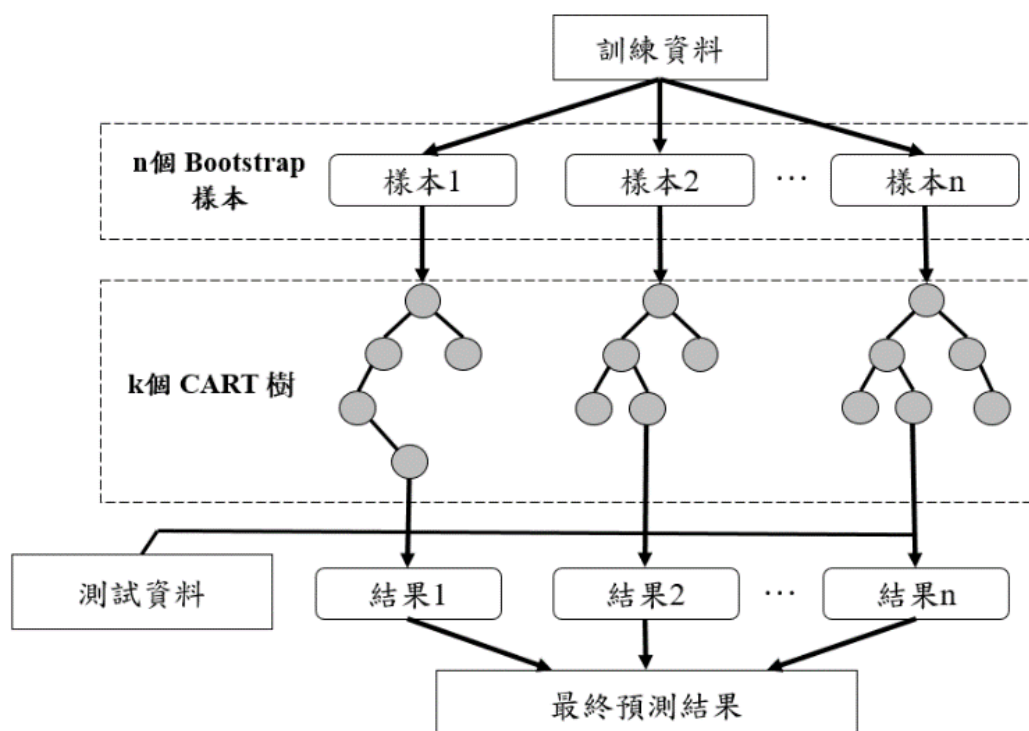


圖4-5、隨機森林建模之流程

## 3. 支持向量機

支持向量機是一種監督式的機器學習演算法，可用於對線性或非線





性數據進行分類和迴歸分析。支持向量機的作用是通過超平面分離數據，並通過內核技巧擴展決策邊界(Boundaries Margin)。換言之，此算法將通過搜索盡可能寬的最優線性超平面來分離數據，若數據是非線性分類，此方法可以執行內核技巧，將樣本映射到高維空間。

#### 4. 人工神經網路

本計畫預計採用的人工神經網路是以多層感知機(Multilayer Perceptron)為架構，倒傳遞演算法(Backpropagation Algorithm)為學習演算法之倒傳遞神經網路(Back Propagation Neural Networks)，其架構如圖4-6所示，主要由輸入層、隱藏層和輸出層等三種不同層來構成前饋式神經網路，而每層都由若干個神經元組成，各層之神經元以鍵結值來連接，以監督式學習方式來處理輸入與輸出之間的非線性映射關係。倒傳遞演算法的網路訓練有兩階段，分別事前饋皆對以及倒傳遞階段。在前饋階段時，輸入向量由輸入層引入，以前饋方式經由隱藏層傳到輸出層，並計算出網路輸出值，此時，網路的鍵結值都是不變的；在倒傳遞階段時，網路的鍵結值則根據錯誤更正法則來進行修正，藉由鍵結值的修正，以使網路的輸出值趨向於期望輸出值。

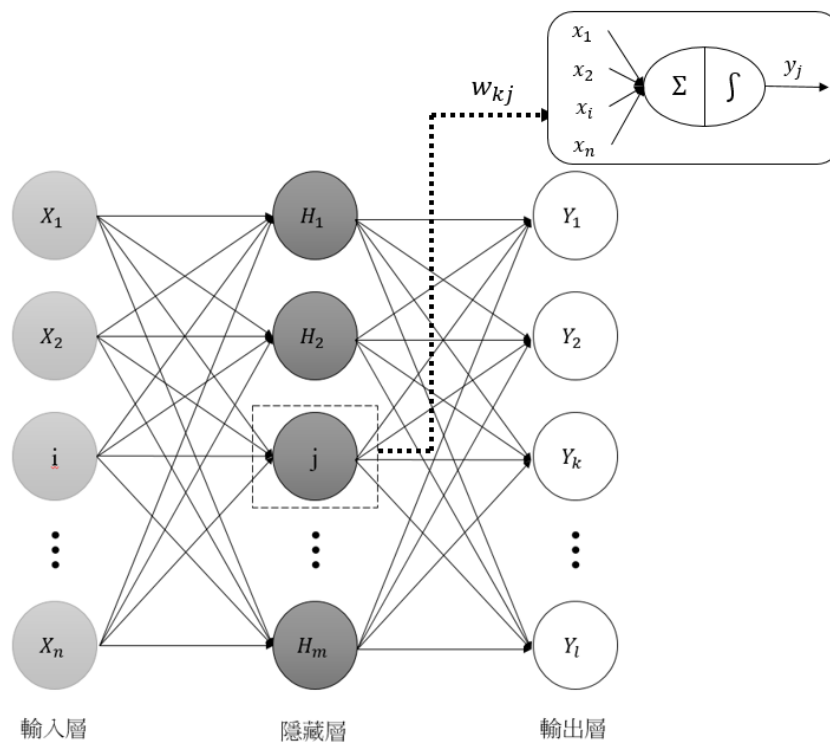


圖4-6、倒傳遞神經網路架構圖



本計畫利用前處理之特徵，將測試不同特徵之設計與降雨量，將採用線性迴歸、隨機森林、支持向量機、人工神經網路等演算法進行地下水砷濃度變化預測模型之建置，說明如下。

### 5. 模型之驗證與評估指標

首先採用交叉驗證（Cross Validation，CV）技術建立和驗證預測結果。評估的指標包含平均絕對誤差（Mean Absolute Error，MAE）、平均平方誤差（Mean Square Error，MSE）、相關係數（Correlation Coefficient，COR），以及  $R^2$  其定義如下：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$$

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

其中  $n$  為資料筆數， $\hat{y}$  為預測砷濃度， $y$  為真實砷濃度。

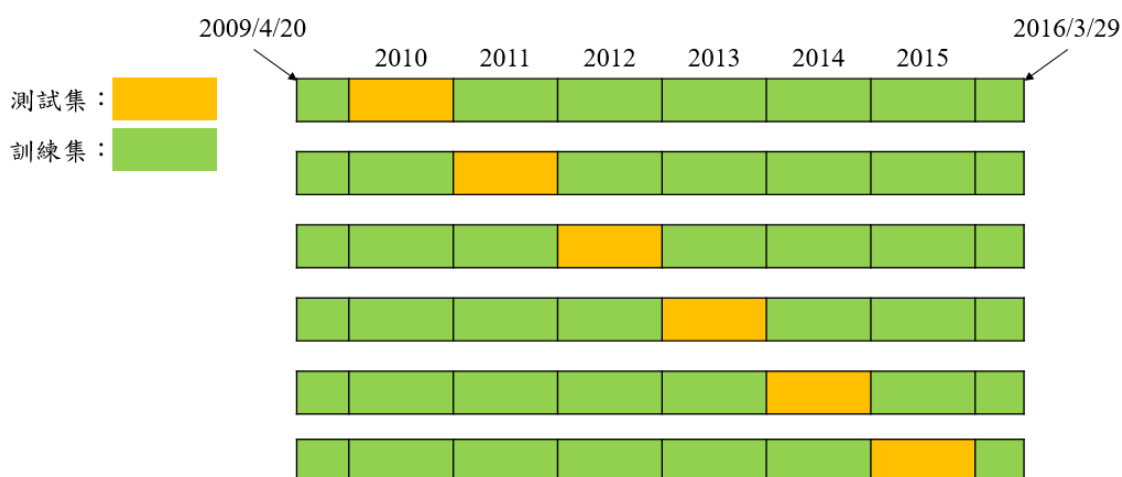


圖4-7、模型交叉驗證示意圖



# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

## 七、工作進度甘特圖

本計畫工作執行皆符合原定工作進度甘特圖之規劃，如表4-2所示，截至期末報告(111年1月14日)前，已全數完成預定工作工項。

表4-2、本計畫工作進度甘特圖

| 年月<br>工作項目                                                                                  | 1  | 2   | 3                                    | 4   | 5   | 6      | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12     | 備<br>註 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----|--------------------------------------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|--------|--------|
| 水文、水質、水井用<br>電資料之資料蒐集、<br>索取及前處理等                                                           | ■  | ■   | ■                                    | ■   |     |        |     |     |     |     |     |        |        |
| 以動態因子分析篩選<br>必要且具代表性的變<br>數與其空間點位                                                           |    |     | ■                                    | ■   | ■   | ■      |     |     |     |     |     |        |        |
| 以機器學習方式建立<br>地下水砷濃度變化預<br>測模型並進行驗證                                                          |    |     |                                      |     |     | ■      | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   |        |        |
| 研提引灌富砷地下水<br>之調適與因應方案                                                                       |    |     |                                      |     |     |        |     |     |     |     | ■   | ■      |        |
| 研究結果分析及報告<br>撰寫                                                                             |    |     |                                      |     | ■   | ■<br>※ |     |     |     |     | ■   | ■<br>※ |        |
| 工作進度估計百分比<br>( 累 積 數 )                                                                      | 5% | 15% | 25%                                  | 30% | 40% | 50%    | 55% | 65% | 75% | 80% | 90% | 100%   |        |
| 預定查核點                                                                                       | 期中 |     | 完成基礎資料蒐集及前處理，並完成動態因子分析工作。            |     |     |        |     |     |     |     |     |        |        |
|                                                                                             | 期末 |     | 完成地下水砷濃度變化預測模型建置，並研提引灌富砷地下水之調適與因應方案。 |     |     |        |     |     |     |     |     |        |        |
| 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。                                                |    |     |                                      |     |     |        |     |     |     |     |     |        |        |



## 第五章 結果與討論

### 5.1 地下水砷濃度目標監測井篩選結果

#### 一、歷年平均砷濃度空間分布

有鑑於每口監測井砷濃度具有不同變化趨勢，為掌握砷濃度超過監測標準及變化較大之名單，本計畫彙整彰化縣與雲林縣之既有監測井名單，並搭配本計畫水井電表之資料時間區間(2007/01/01~2018/06/30)，每口監測井之平均砷濃度分布如圖5-1所示，顯示彰化縣以東興國小、大村國中及新寶國小之平均砷濃度值較大、雲林縣則以台西國小及育英國小之平均砷濃度值較大。

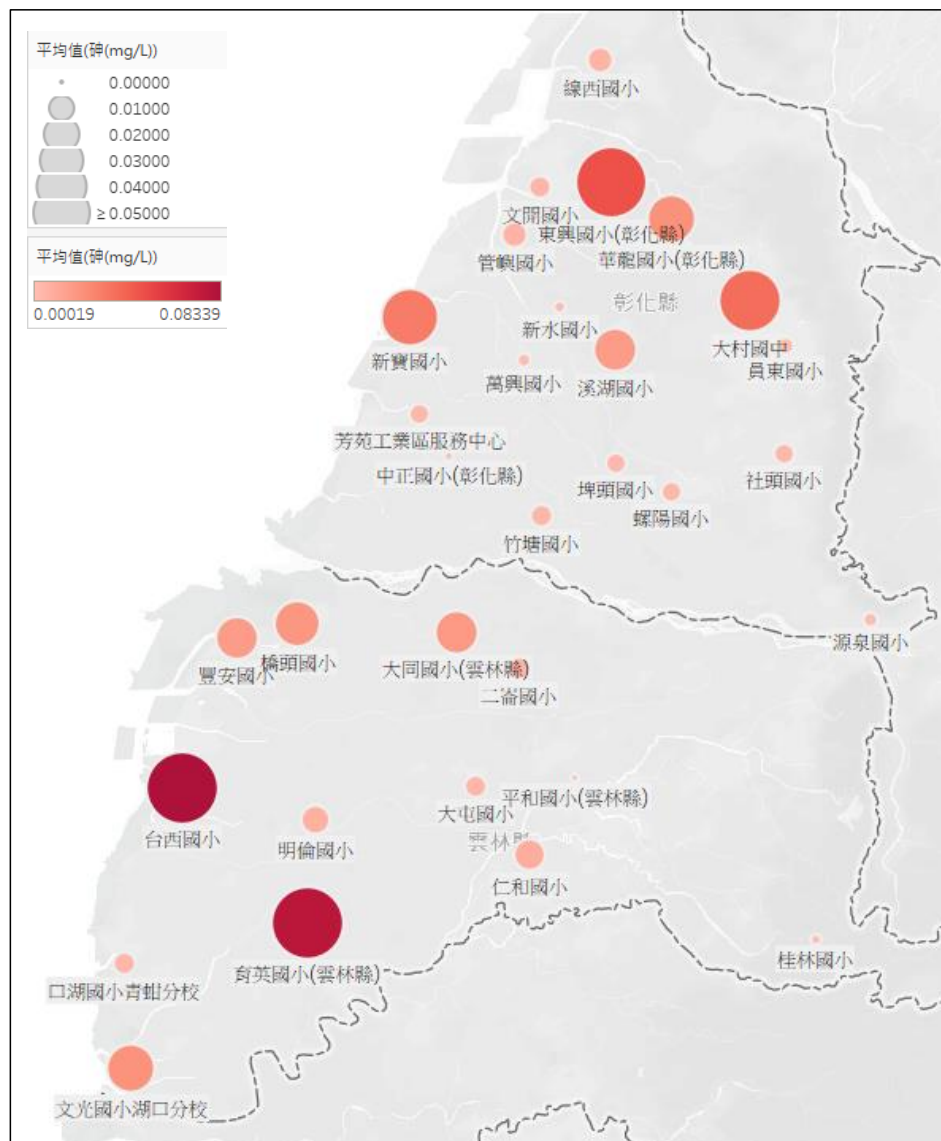


圖5-1、彰化縣與雲林縣平均砷濃度分布圖



## 二、目標監測井名單篩選方式

由於砷濃度在低於監測標準情形時，除了監測數據大多低於監測標準之外，其變化趨勢亦不明顯，意即不用透過模型預測就可以知道該口砷濃度都是低於監測標準、甚至是檢測不出濃度，因此，本計畫除了考量砷濃度監測標準(第一類標準為0.025 mg/L、第二類標準為0.25 mg/L)之外，為掌握彰化縣與雲林縣平均砷濃度偏高之監測井，分別篩選砷濃度超過平均值(彰化縣平均砷濃度為0.00953 mg/L、雲林縣平均砷濃度為0.01457 mg/L)之監測井進行後續討論。本計畫首先篩選此彰化縣及雲林縣在時間範圍為2007/01/01至2018/06/30之砷濃度超過平均值者，各口監測井之平均砷濃度長條圖如圖5-2所示，顯示彰化縣超過平均值之監測井包括東興國小、大村國中、新寶國小、華龍國小、溪湖國小等5口監測井，而雲林縣超過平均值之監測井則包括台西國小、育英國小、文光國小湖口分校、橋頭國小、大同國小、豐安國小等6口監測井。

本計畫接著將上述單口平均砷濃度超過整體平均砷濃度之11口監測井，繪製其歷年砷濃度之盒鬚圖(如圖5-3所示)，顯示平均砷濃度越大之監測井，例如台西國小、育英國小等，其歷年砷濃度分布之最大值及最小值之範圍亦較廣，而再進一步繪製各口監測井歷年砷濃度隨時間之分布圖，如圖5-4(彰化縣)、圖5-5(雲林縣)所示，圖中之圖形大小代表砷濃度測值，圖形越大代表砷濃度值越高，反之亦然而灰底則代表砷濃度介於1倍標準差範圍內，若監測資料超過此範圍，則視為變動較大者，反之亦然。此外，由圖5-5顯示雲林縣育英國小及豐安國小等2口監測井僅近年有砷濃度測值，原因為該2口為近年新設置之監測井，考量水井電表時間區間範圍內其監測數量不足且時間序列有中斷情形，故本計畫在篩選後續分析名單時，亦排除育英國小及豐安國小等2口資料不齊全之監測井。

綜上所述，本計畫目標監測井名單篩選方式是以該口監測井平均砷濃度是否超過整體平均砷濃度為優先考量，並排除資料有缺漏之監測井名單，因此，本計畫後續分析砷濃度之目標監測井包括彰化縣東興國小、大村國中、新寶國小、華龍國小、溪湖國小等5口監測井，以及雲林縣台西國小、文光國小湖口分校、橋頭國小、大同國小等4口監測井。





第五章 結果與討論

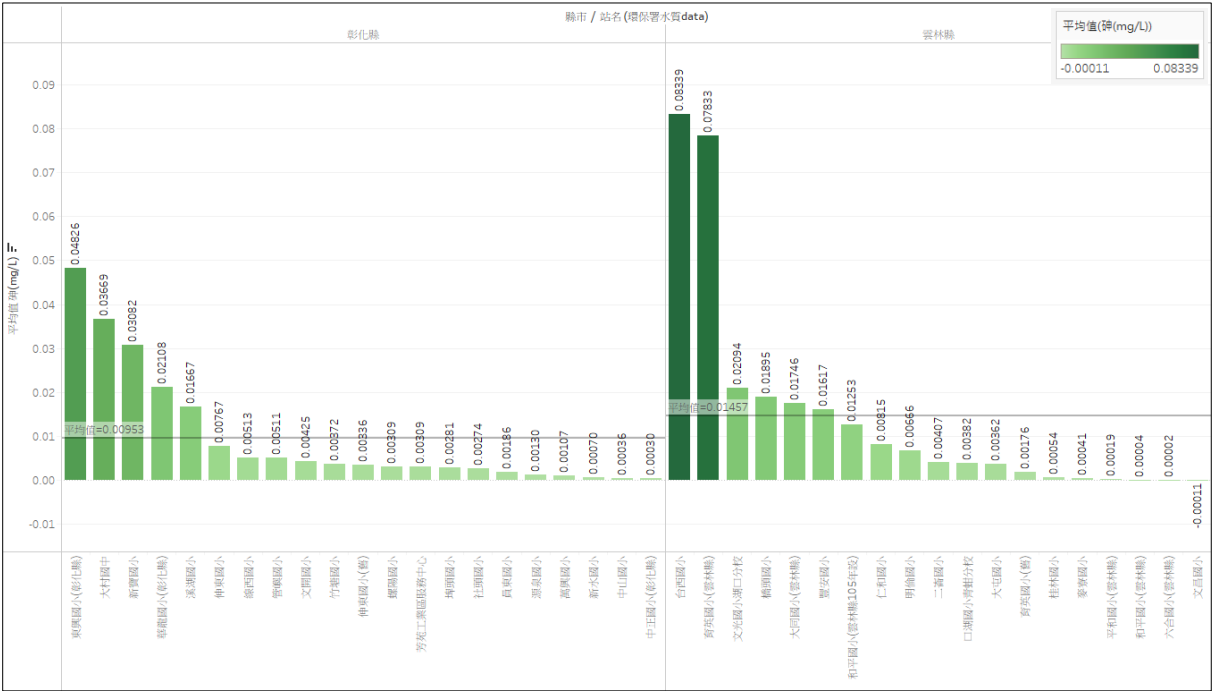


圖5-2、彰化縣與雲林縣平均砷濃度長條圖

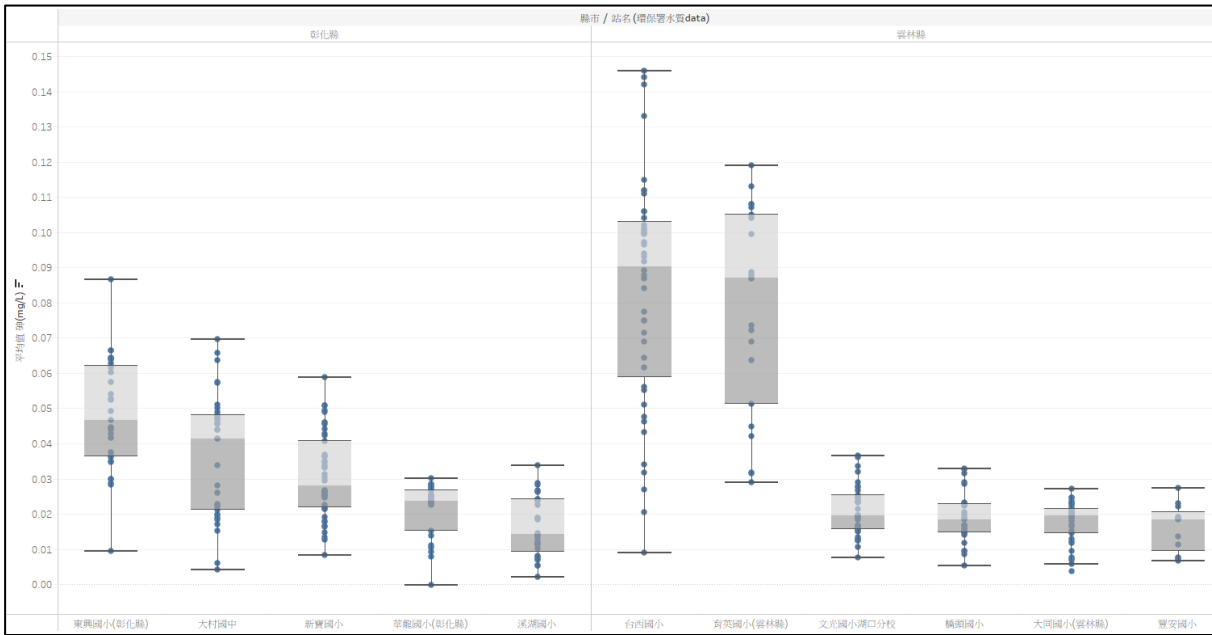


圖5-3、彰化縣與雲林縣砷濃度盒鬚圖



## 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

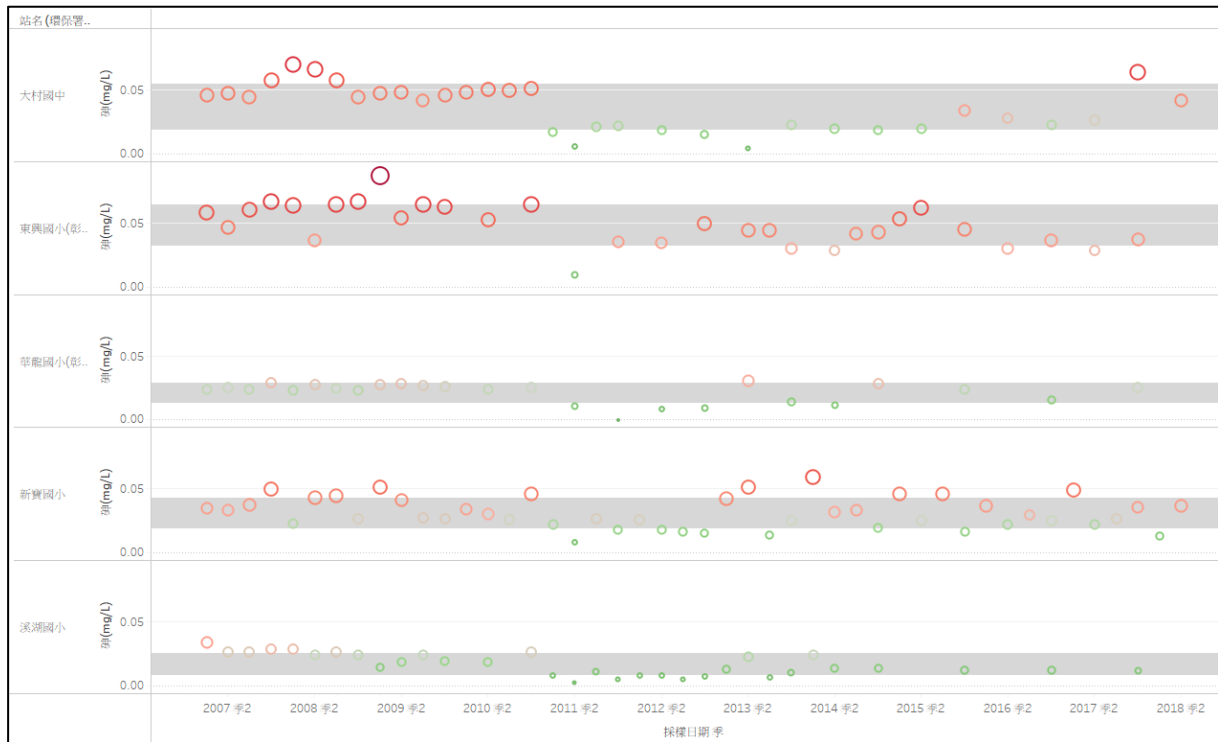


圖5-4、彰化縣歷年砷濃度隨時間之分布圖

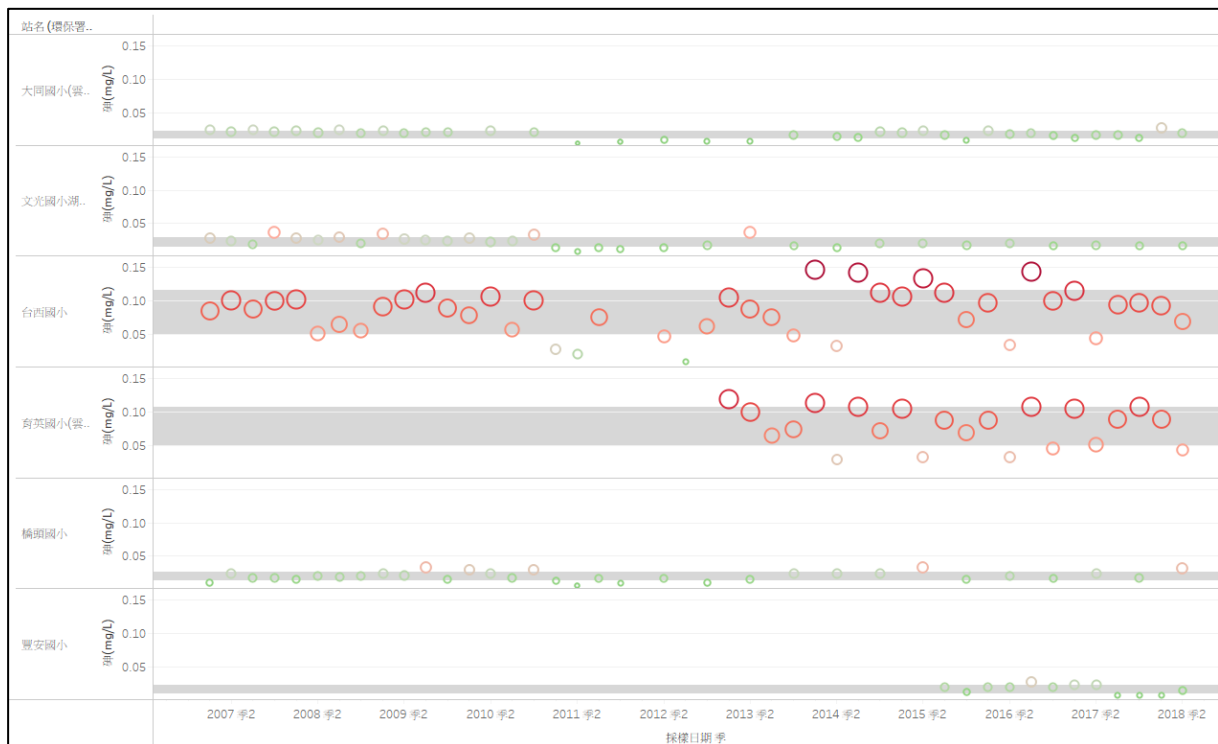


圖5-5、雲林縣歷年砷濃度隨時間之分布圖



## 5.2 電量轉換抽水量評估結果

經濟部水利署(2017)已針對彰化縣及雲林縣部分鄉鎮(共計25個鄉鎮)之灌溉水井，利用抽樣方式篩選及統計各鄉鎮之用電資料及水電比，並據以建立灌溉水井之抽水量建立經驗推估公式，即利用井徑、馬力、井深、抽水揚程等資料建立抽水量及用電度數比值之多變項迴歸分析，本計畫分別針對彰化縣及雲林縣監測井砷濃度最高之鄉鎮(彰化縣鹿港鎮及雲林縣台西鄉)，進行上述資料統計分析，詳細說明如下。

### 一、馬達型式

圖5-6為雲林縣台西鄉及彰化縣鹿港鎮之馬達型式直條圖，顯示雲林縣台西鄉以沉水式為最大宗，其次為立軸式與離心式，而彰化縣鹿港鎮則以立軸式為最大宗，其次為離心式與沉水式，顯示此兩個鄉鎮之水井馬達型式具有明顯差異。

### 二、馬達馬力

圖5-7為雲林縣台西鄉及彰化縣鹿港鎮之馬達馬力直方圖，顯示雲林縣台西鄉之馬力介於2~6 HP，而彰化縣鹿港鎮則介於0~4 HP，顯示此兩個鄉鎮之水井馬達馬力具有明顯差異，雲林縣台西鄉之馬力普遍較彰化縣鹿港鎮高。

### 三、井深、井徑

圖5-8為雲林縣台西鄉及彰化縣鹿港鎮之井深、井徑資料來源長條圖，顯示雲林縣台西鄉及彰化縣鹿港鎮之井深、井徑大多是申請人口述所得到的數據，僅部分彰化縣鹿港鎮之井徑有實測資料。

圖5-9為雲林縣台西鄉及彰化縣鹿港鎮之井深直方圖，顯示雲林縣台西鄉之井深以0~50公尺為最大宗(約佔63%)，另亦分布在50~250公尺(約佔37%)，而彰化縣鹿港鎮之井深以0~50公尺為最大宗(約佔95%)，顯示此兩個鄉鎮之水井井深分布具有明顯差異。

圖5-10為雲林縣台西鄉及彰化縣鹿港鎮之井徑直方圖，顯示雲林縣台西鄉之井徑以5~6 inch 為最大宗，其次為6~7 inch，而彰化縣鹿港鎮之井徑以4~5 inch 為最大宗，其次為1~2 inch、5~6 inch、2~3 inch，顯示此兩個鄉鎮之水井井徑分布具有明顯差異。

### 四、電表型式、用水型態



圖5-11為雲林縣台西鄉及彰化縣鹿港鎮之電表型式、用水型態之文字雲視覺化呈現圖，顯示雲林縣台西鄉及彰化縣鹿港鎮之電表型式以專用電表為大宗，其中，雲林縣台西鄉之用水型態以農業用水(灌溉-旱作)為大宗，其次為農業用水(灌溉-其他)、農業用水(灌溉-一期水稻)，而彰化縣鹿港鎮之用水型態則以農業用水(灌溉-二期水稻)為大宗，其次為農業用水(灌溉-一期水稻)、農業用水(灌溉-旱作)。此外，非專用電表型式區分為與其他水井共用及與其他電器設備共用等二種型式，雲林縣台西鄉之非專用電表型式以與其他水井共用占大宗，其中用水型態以農業用水(養殖-鹹水)、農業用水(養殖-淡水)為主，而彰化縣鹿港鎮之非專用電表型式以與其他電器設備共用占大宗，其中用水型態以家庭用水占大宗。

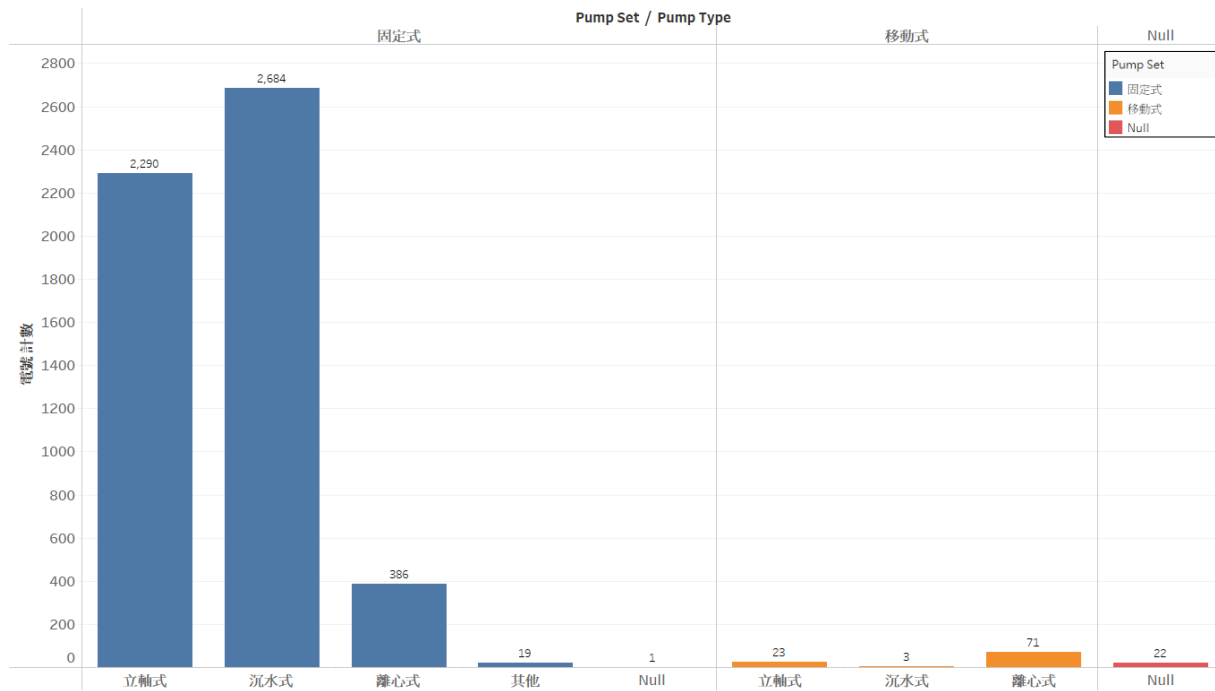
再者，水利署研擬之「納管水井輔導管理作業原則(草案)」，是以納管之農業灌溉水井允以獨立電表作為計量設備，乃基於水井抽水所耗電量與其抽水量具正相關性，然複查作業未辦理各鄉鎮(僅針對25個鄉鎮)之灌溉水井水電比(即每度電量之抽水量比值)試驗，無法以電量推計各鄉鎮之水井抽水量，故在管理面亦直接以水井使用電量為主。

## 五、小結

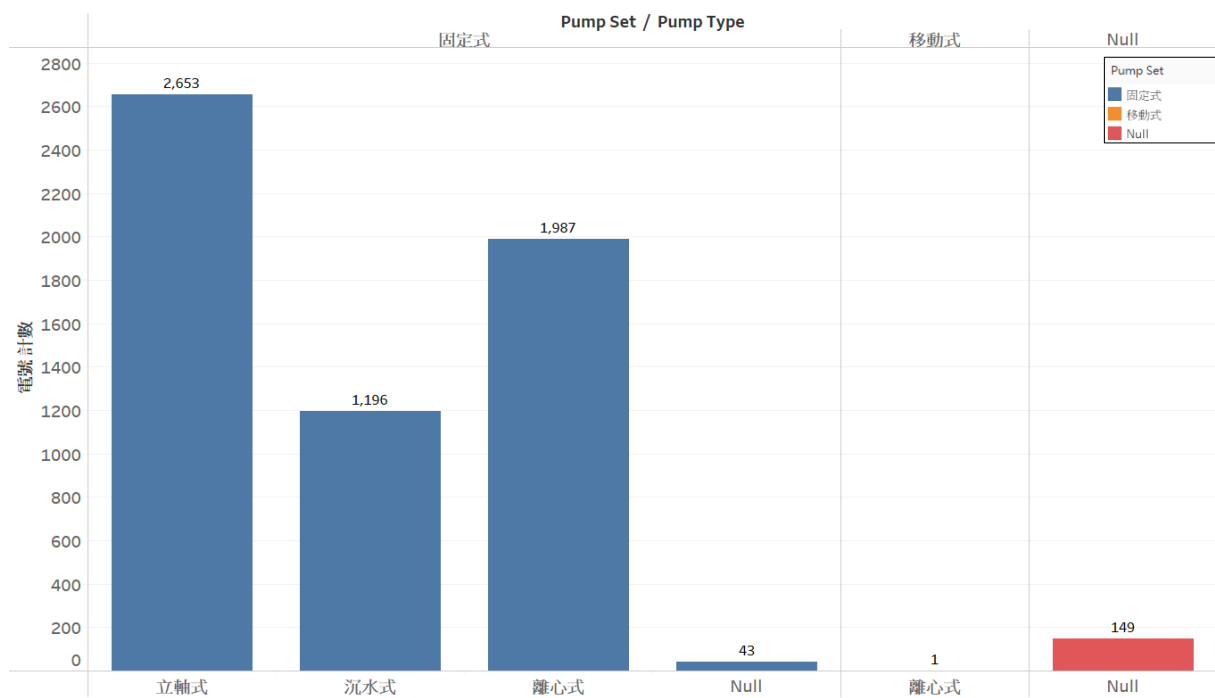
綜上所述，由馬達型式與馬達馬力分析結果，顯示兩個鄉鎮之馬達具有明顯差異，故在電量轉換抽水量時，兩個鄉鎮應分開計算以避免馬達型式不同而造成之水電比差異；此外，兩個鄉鎮之井深、井徑資料來源多為申請人口述，詳細井深、井徑資料已不可考，且由分析結果顯示兩個鄉鎮之井深、井徑具有明顯差異，故此類資料存在很大的存疑空間；而兩個鄉鎮之電表型式皆以專用電表為大宗，而兩個鄉鎮非專用電表之共用設備不同，故應分開討論；此外，用水型態兩個鄉鎮之用水目的亦具有明顯差異。考量水井資料來源不可考及用水型態不同，且空間位置不同存在很大的差異性，故馬達、井深、井徑、用水型態等在轉換時存在不確定性極高，再加上各鄉鎮之不同馬達型態(地上式及沉水式)所得出之經驗公式係數不同，且經濟部水利署(2017)僅執行彰化縣及雲林縣部分鄉鎮，並未包含本計畫砷濃度較高之彰化縣鹿港鎮，因此，本計畫在電量資料使用方面，並非利用前人迴歸分析而得到之抽水量轉換公式進行資料轉換，而是直接以電量資料當作特徵值，執行後續之動態因子分析、機器學習模型之建置等工作。



## 第五章 結果與討論



(a) 雲林縣台西鄉



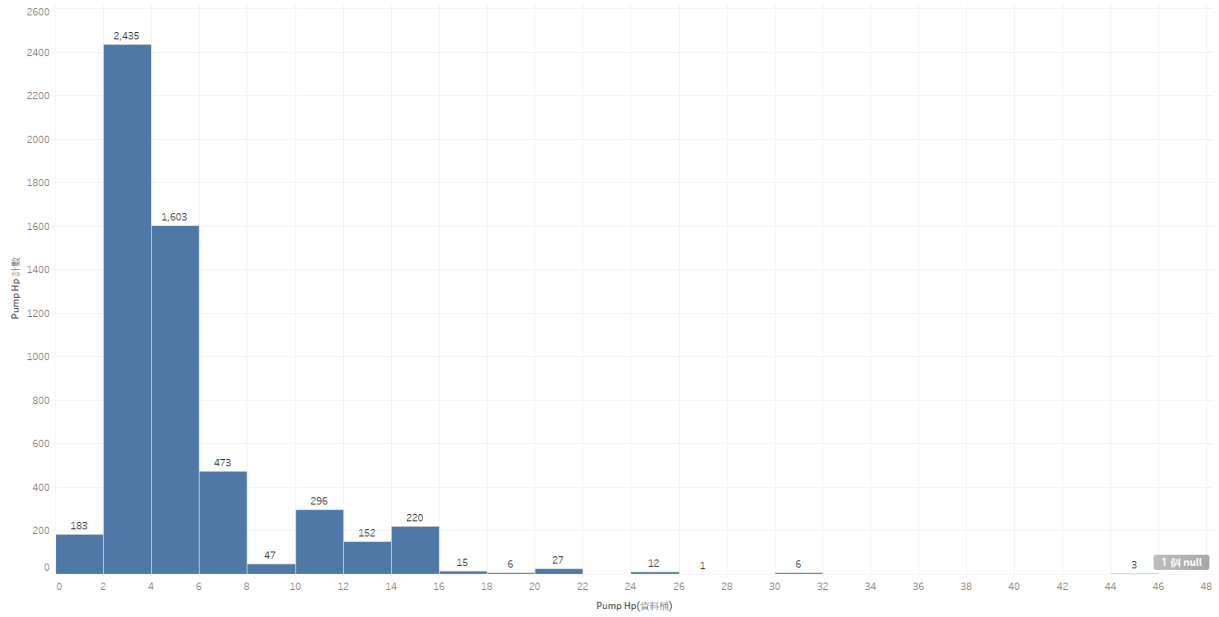
(b) 彰化縣鹿港鎮

圖5-6、馬達型式統計長條圖

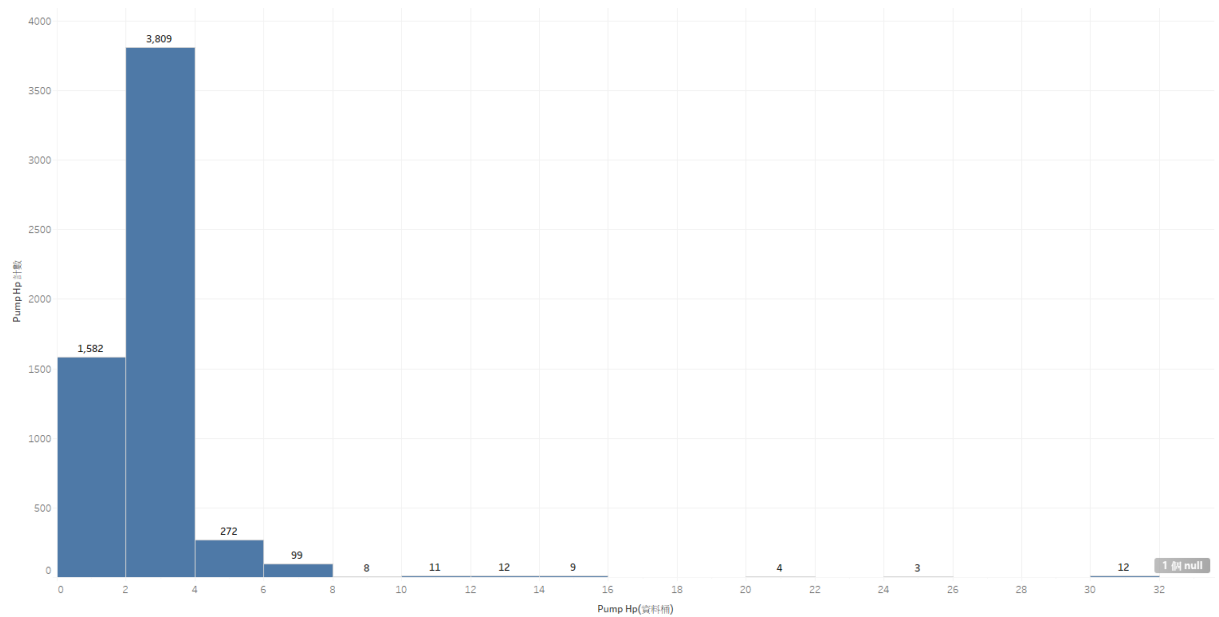




# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案



(a) 雲林縣台西鄉

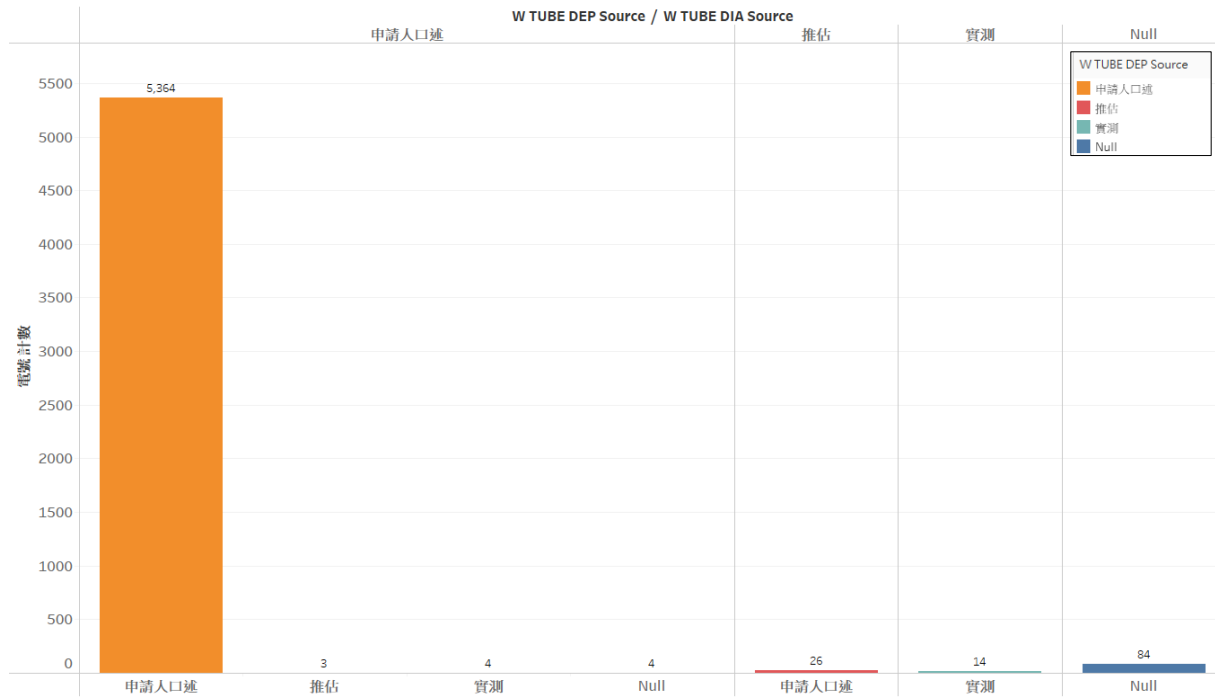


(b) 彰化縣鹿港鎮

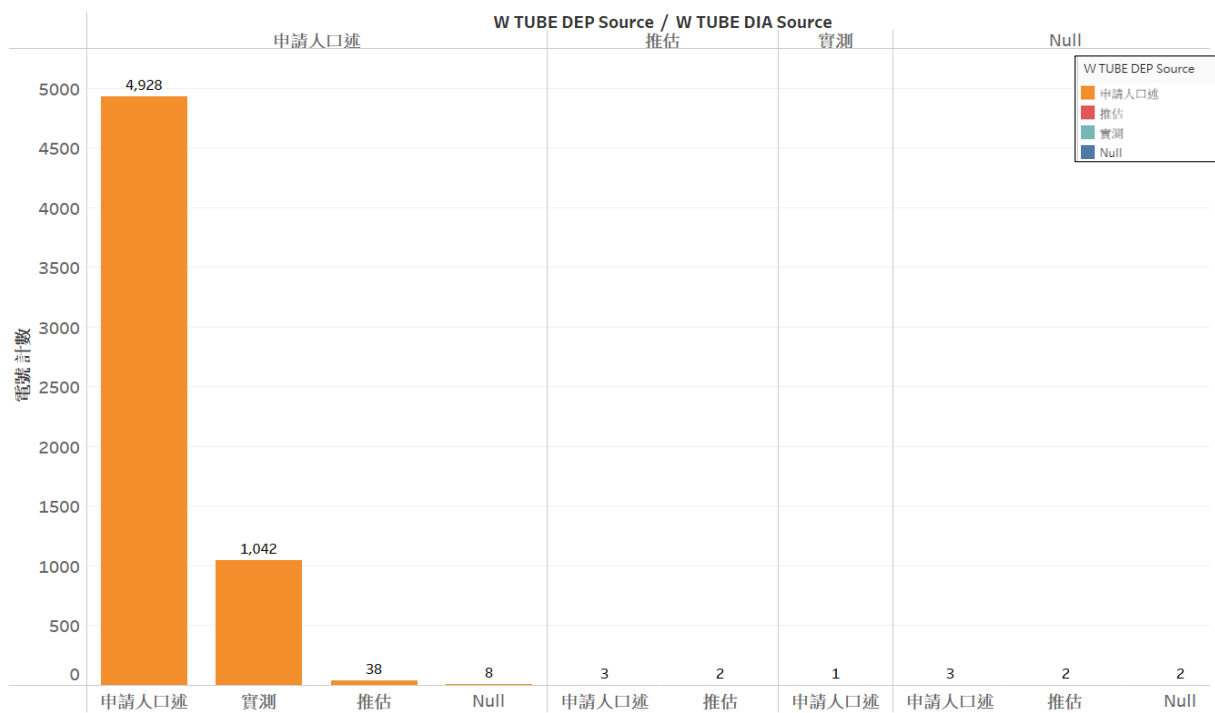
圖5-7、馬達馬力統計長方圖



## 第五章 結果與討論



(a) 雲林縣台西鄉

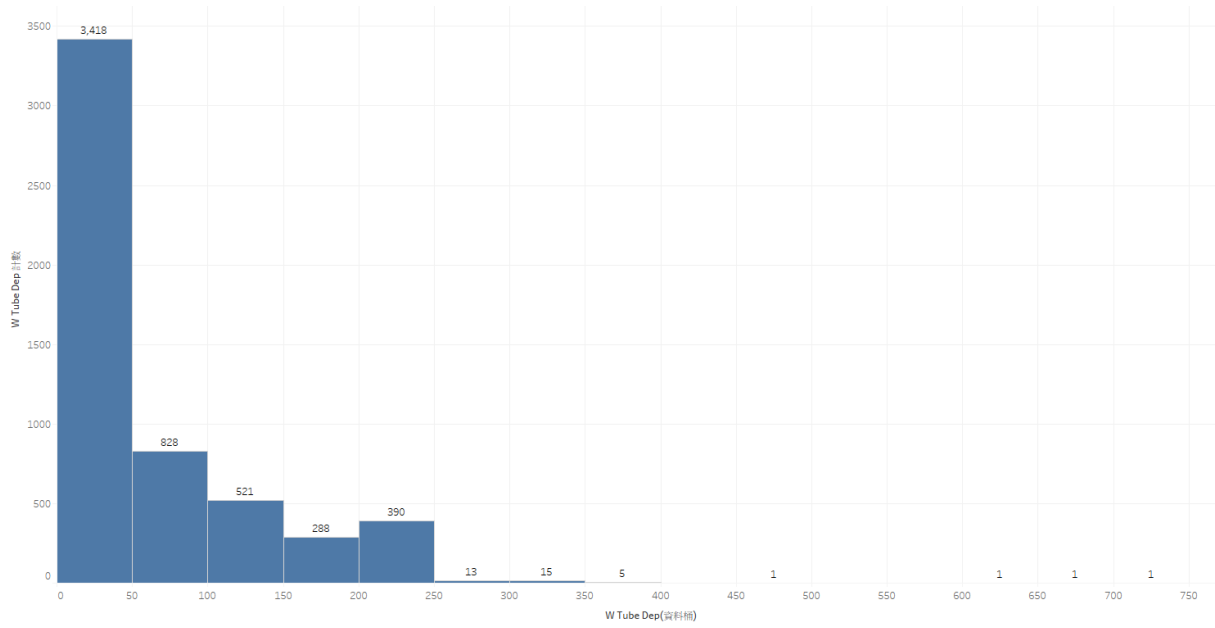


(b) 彰化縣鹿港鎮

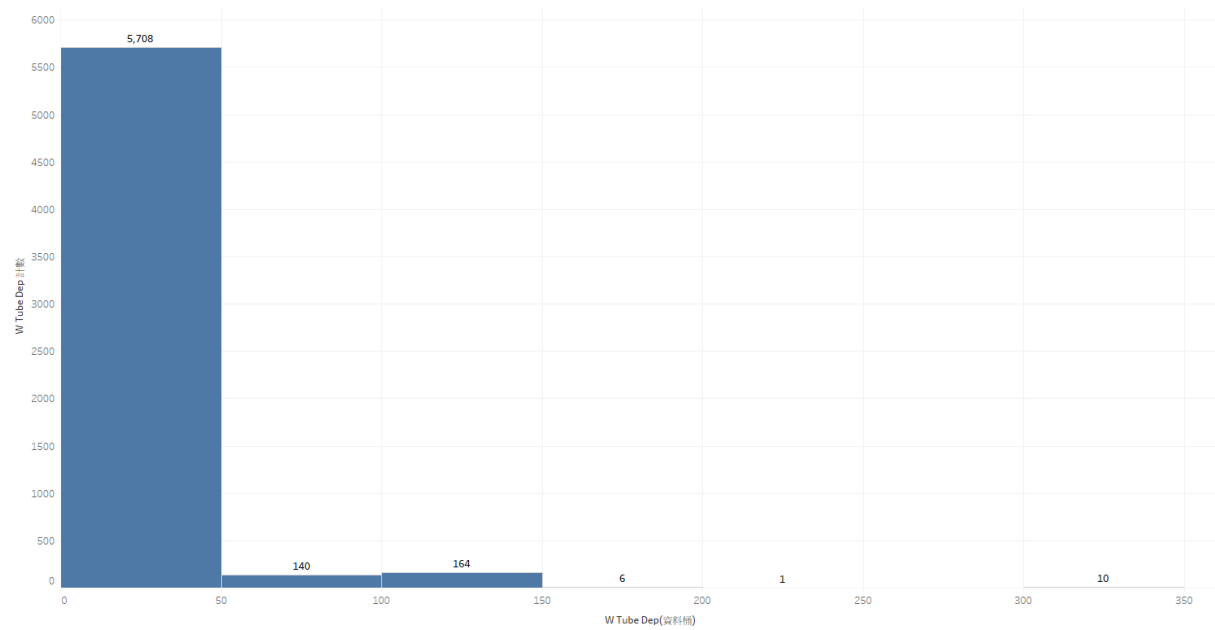
圖5-8、井深及井徑資料來源統計長條圖



# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案



(a) 雲林縣台西鄉

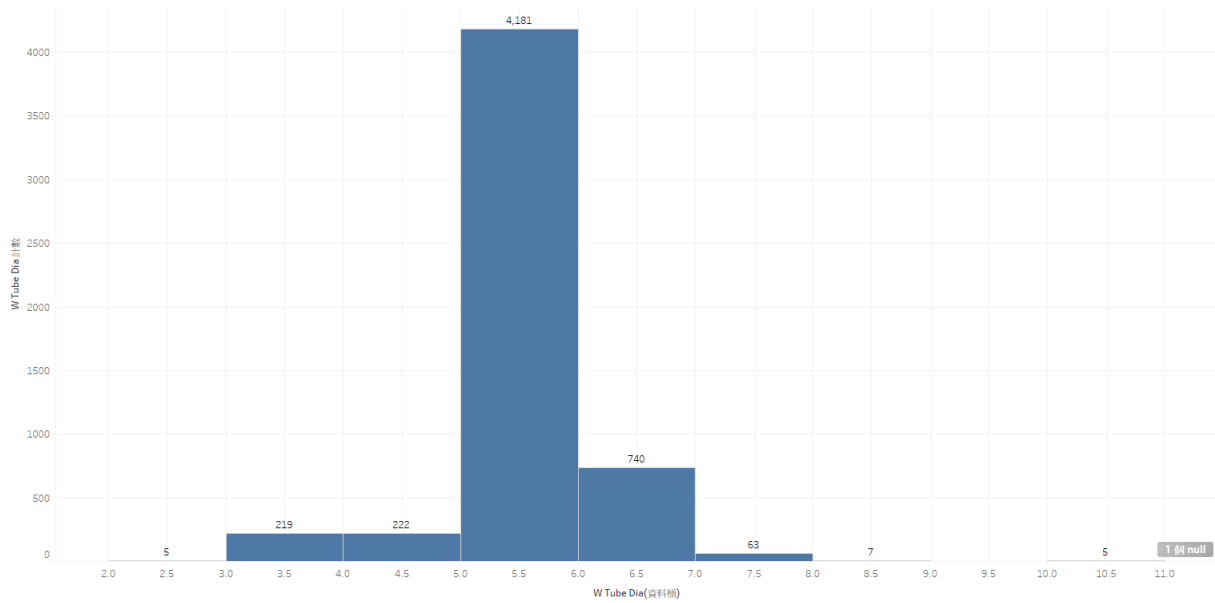


(b) 彰化縣鹿港鎮

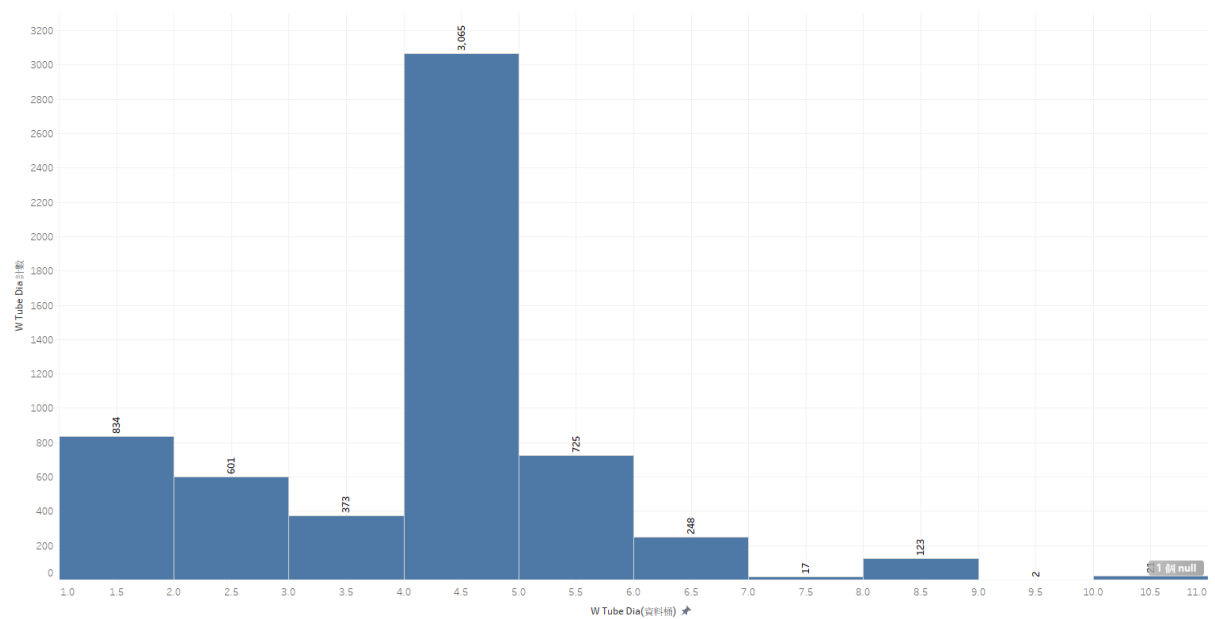
圖5-9、井深統計直方圖



## 第五章 結果與討論



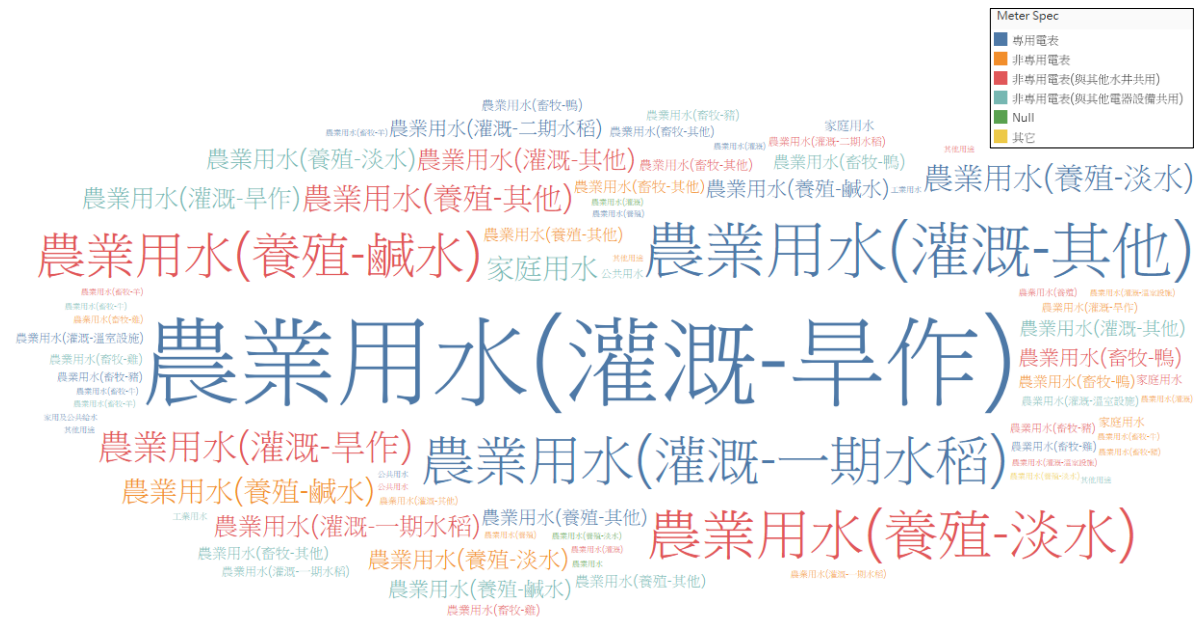
(a) 雲林縣台西鄉



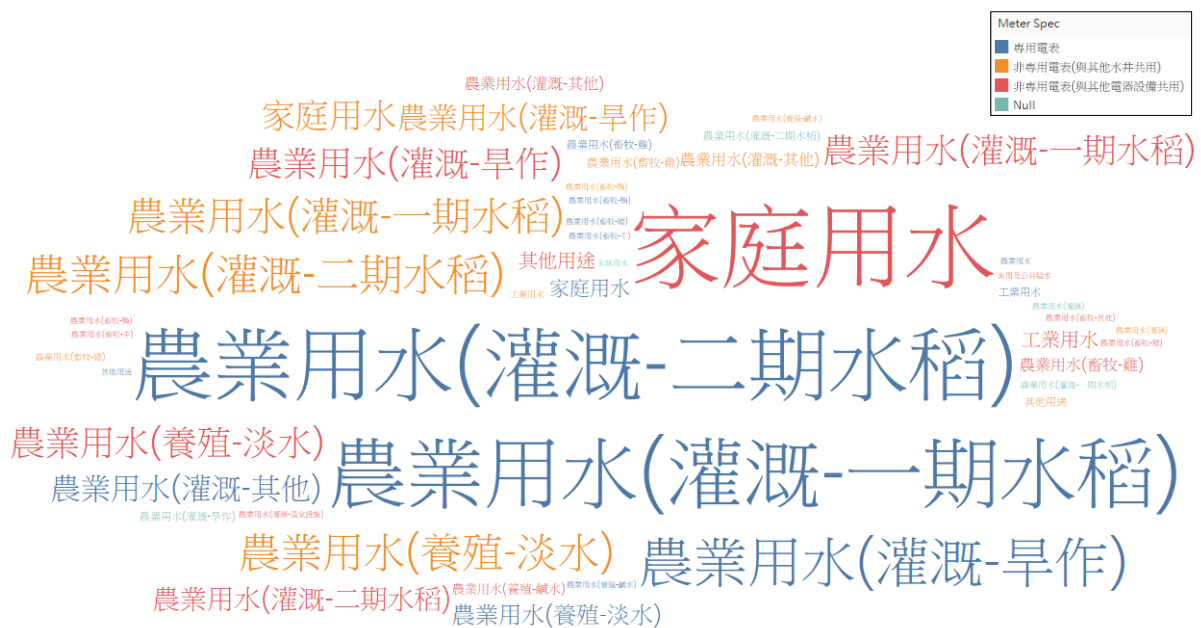
(b) 彰化縣鹿港鎮

圖5-10、井徑統計直方圖

# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案



(a) 雲林縣台西鄉



(b) 彰化縣鹿港鎮

圖5-11、電表型式與用水型態文字雲視覺化呈現圖





### 5.3 動態因子分析

由於砷濃度與用電量資料之單位不同，且數值大小差異極大，而造成各自的變化程度不一，進而影響動態因子分析的結果，因此，本計畫在執行動態因子分析前，先將砷濃度與用電量資料進行正規化(Normalization)，意即將原始資料的數據按比例縮放於0~1區間中，且不改變其原本分布狀況，正規化結果可以排除資料單位的限制，提供砷濃度與用電量資料在一個相同的基準，來進行後續之動態因子分析工作。

#### 一、常態性分布判別

由於在正規化前須先判斷資料是否屬常態分布，而本計畫砷濃度與用電量資料皆小於50筆(至多46筆資料)，故採用 Shapiro-Wilk 統計量來檢定樣本數在50個以下的常態性假設，由表5-1結果顯示本計畫分析9口目標監測井之砷濃度，共有7口屬常態分布( $p\text{-value}>0.05$ )，分別為溪湖國小、新寶國小、大村國中、文光國小湖口分校、橋頭國小、台西國小、東興國小等7口監測井，另由圖5-12之直方圖顯示此7口之樣本分布較符合常態分布，且 Q-Q plot 圖之樣本分布亦較接近直線，意即較符合常態分布；而大同國小、華龍國小等2口監測井則屬左偏分配(左偏拖長)。

表5-1、目標監測井砷濃度之常態分布檢定結果

| 監測井名稱    | Shapiro-Wilk 常態性檢定 |     |              |
|----------|--------------------|-----|--------------|
|          | 統計量                | 自由度 | 顯著性          |
| 大同國小     | 0.927              | 37  | 0.018        |
| 華龍國小     | 0.835              | 25  | 0.001        |
| 溪湖國小     | 0.944              | 32  | <b>0.095</b> |
| 新寶國小     | 0.973              | 46  | <b>0.343</b> |
| 大村國中     | 0.949              | 33  | <b>0.124</b> |
| 文光國小湖口分校 | 0.966              | 33  | <b>0.381</b> |
| 橋頭國小     | 0.964              | 33  | <b>0.343</b> |
| 台西國小     | 0.971              | 44  | <b>0.324</b> |
| 東興國小     | 0.968              | 30  | <b>0.485</b> |



建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

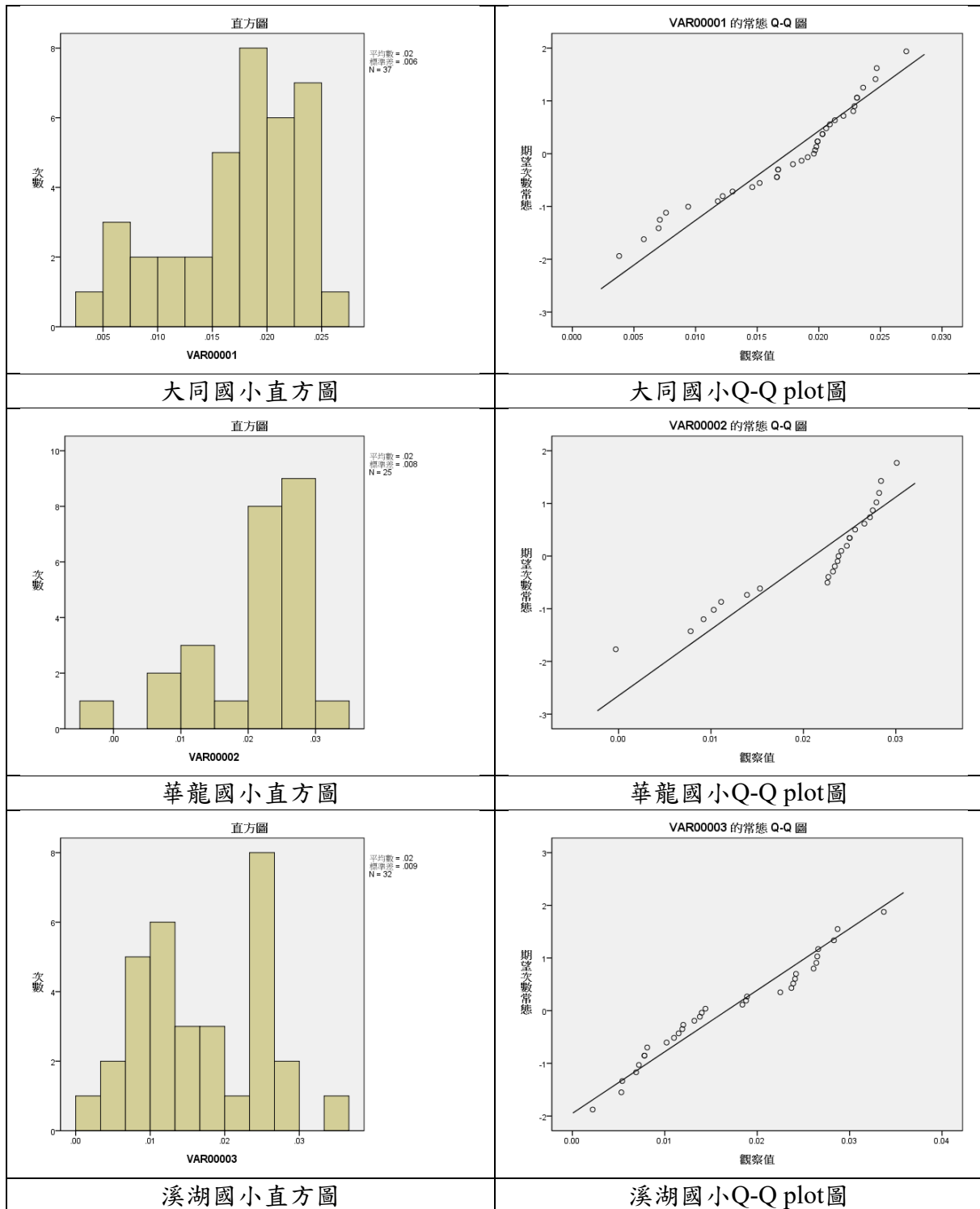


圖5-12、目標監測井砷濃度之直方圖及 Q-Q plot 圖



## 第五章 結果與討論

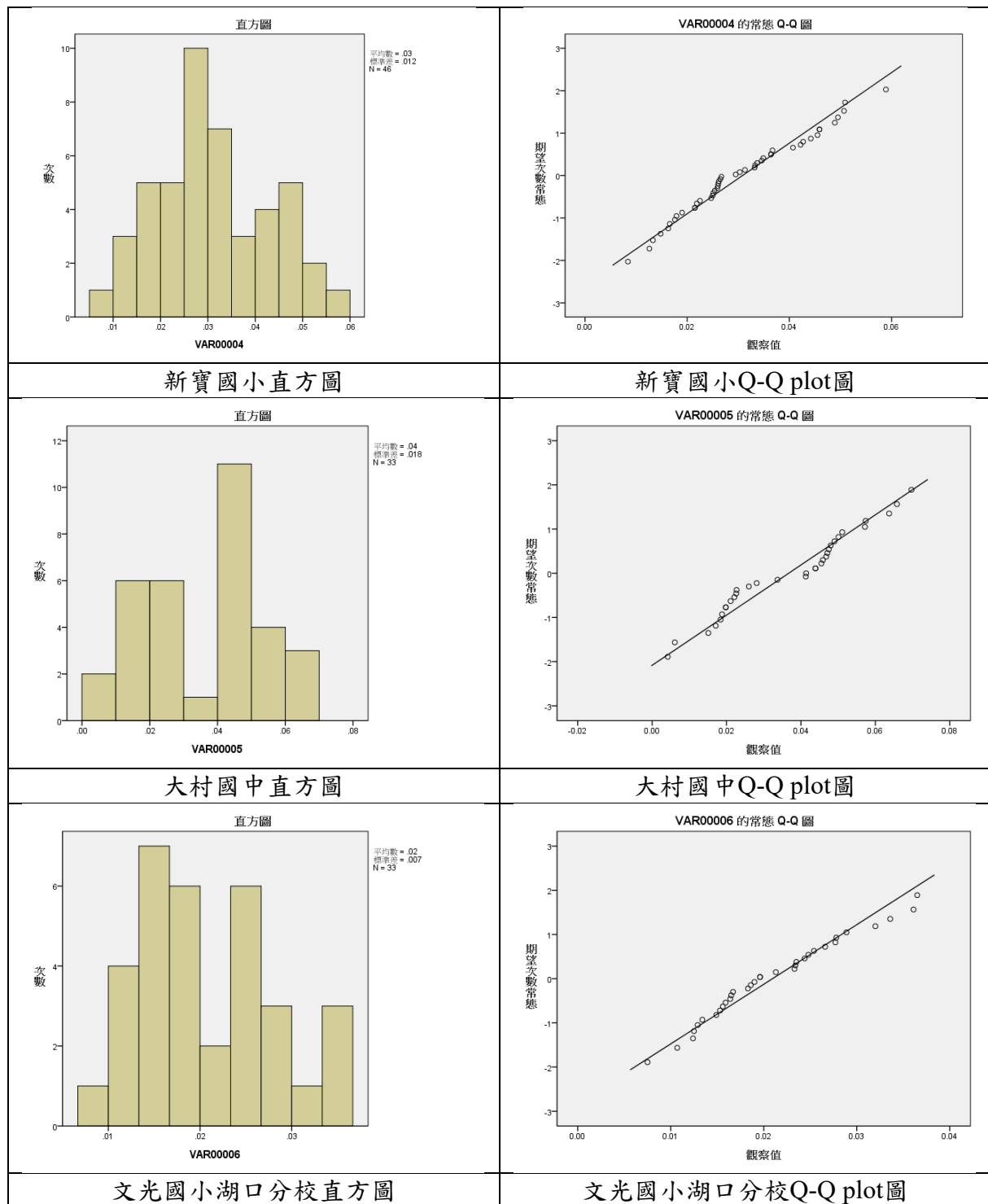


圖5-12、目標監測井砷濃度之直方圖及 Q-Q plot 圖(續1)



建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

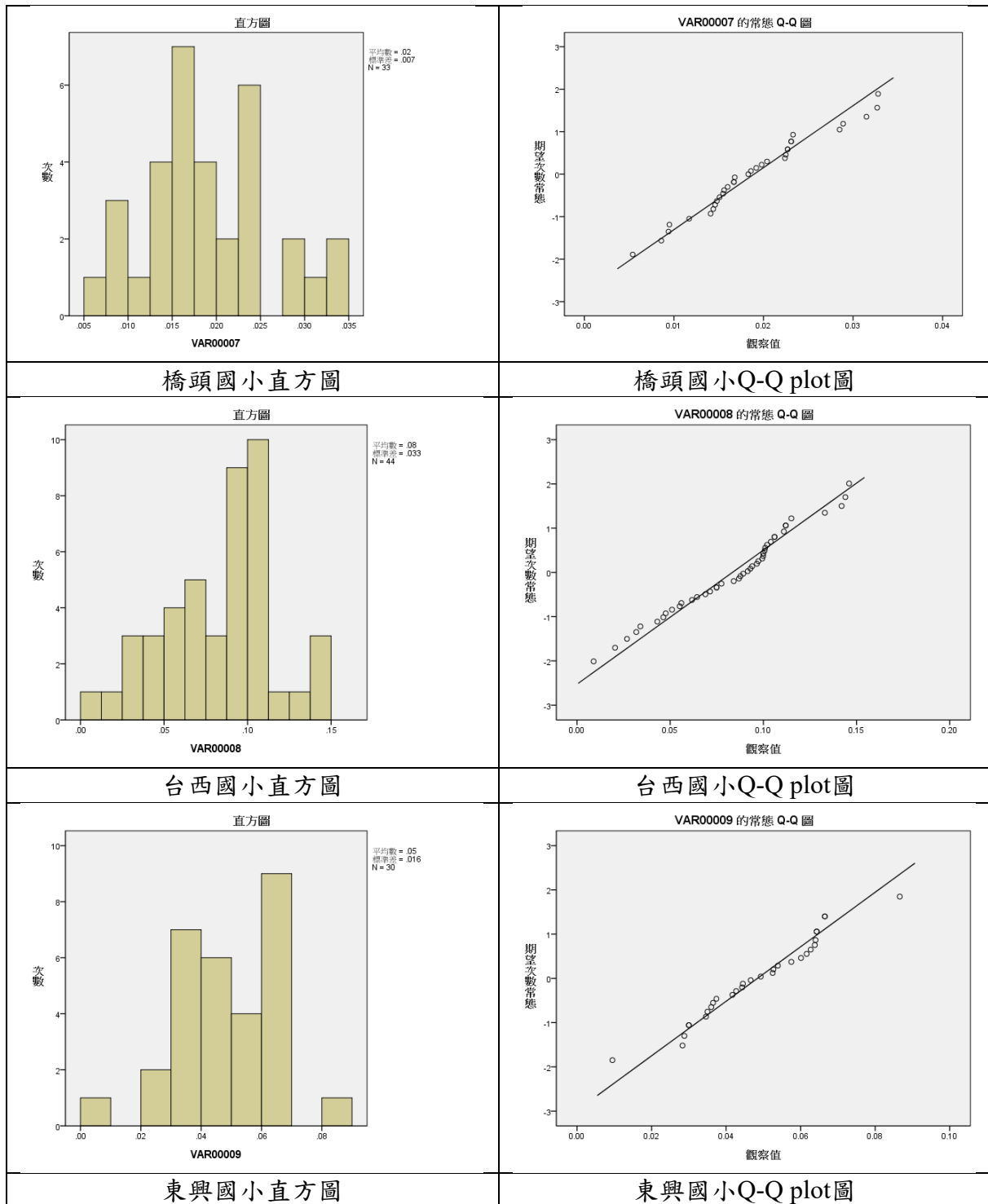


圖5-12、目標監測井砷濃度之直方圖及 Q-Q plot 圖(續2)



## 二、歷年砷濃度分析結果

本計畫優先將上述9口目標監測井之歷年砷濃度彙整後，以移動迴歸模型分離出砷濃度之整體趨勢及季節性變化(如圖5-13所示)，由正規化砷濃度整體趨勢(圖5-13(a))顯示砷濃度在2012年之趨勢最低，本計畫為釐清砷濃度偏低情形，故任意篩選中部地區任一處雨量及地下水位觀測站，由歷年平均雨量(圖5-14)及歷年平均地下水位(圖5-15)顯示在2011年之平均值皆為偏低情形，而由水稻總產量(圖5-16)而言，在2012年雲林縣及彰化縣之總產量相對較高，說明砷濃度與前一年度之平均降雨量及平均地下水位正相關性，而與當年度水稻總產量有負相關性。此外，由季節性變化(圖5-13(b))顯示砷濃度在第1季及第4季之砷濃度較高、在第2季及第3季之砷濃度較低，由於臺灣豐水期大多介於5月至10月之間、枯水期則介於11月至4月之間，此結果說明豐、枯水期之季節性影響確實為造成地下水砷濃度變化因子之一；而由雜訊(圖5-13(c))顯示砷濃度雜訊亦為影響砷濃度結果之重要因素，本計畫將此雜訊定義為受人為抽水影響所造成，故人為抽水影響亦列為本計畫重要探討議題，本計畫將以周遭抽水井之用電量資訊進行後續分析。

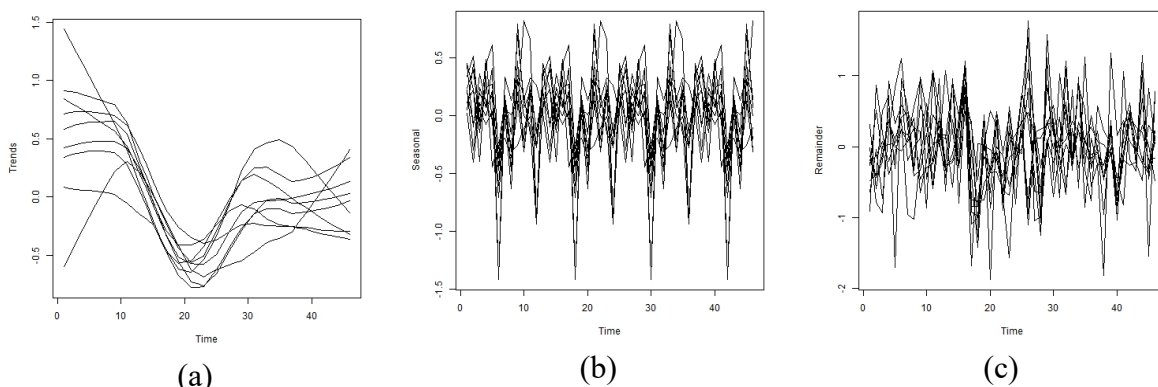
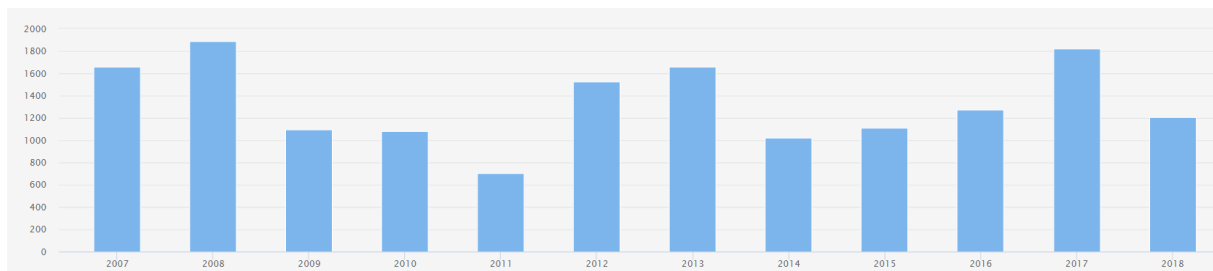


圖5-13、目標監測井正規化砷濃度移動迴歸模型之  
(a)整體趨勢、(b)季節性變化、(c)雜訊(人為抽水)

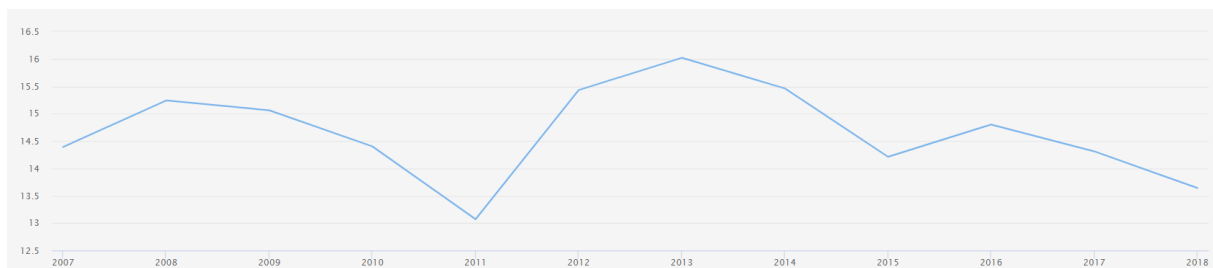


## 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案



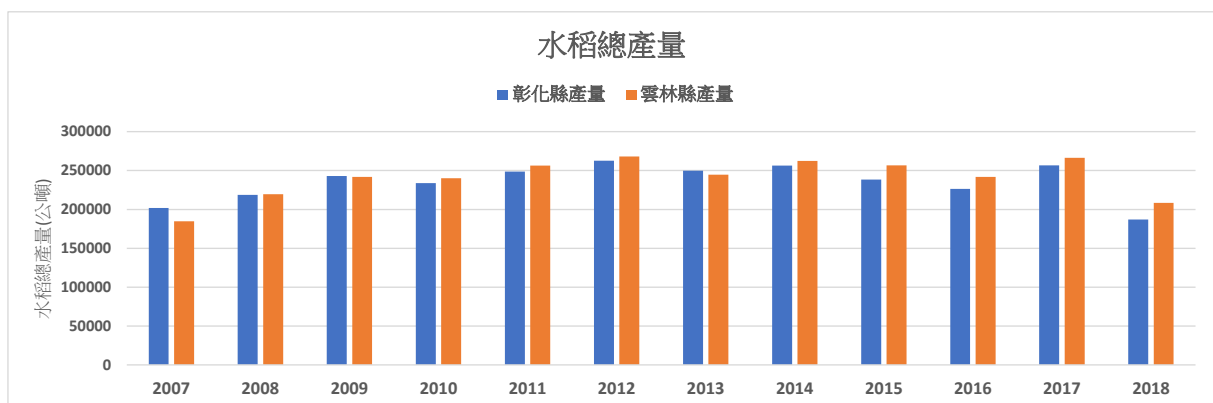
資料來源：經濟部水利署水文資訊網。

圖5-14、雲林縣褒忠(2)雨量站歷年平均雨量



資料來源：經濟部水利署水文資訊網。

圖5-15、雲林縣虎尾(1)地下水站歷年平均地下水位



資料來源：行政院農業委員會農糧署。

圖5-16、彰化縣及雲林縣歷年水稻總產量





### 三、目標監測井周遭最佳影響水井之分析

由於抽水行為亦為造成砷濃度變化之重要因子，故為釐清目標監測井周遭人為抽水情形，本計畫利用動態因子分析依序找出造成每一口監測井砷濃度變化之最佳影響水井數量及其水井最遠距離，最佳影響水井數量決定方式為依序選擇距離監測井最近之水井，當分析之水井用電量模型之AIC、BIC、CAIC等評估指標相對較低時，則將此數量水井視為影響該口監測井砷濃度之最佳影響水井，然由於每口水井電表數值差異過大，即部分水井為十幾度、部分則為幾十萬度，故本計畫統一將水井之電表數值及監測井之砷濃度正規化後，再依序篩選距離監測井最近之水井進行動態因子分析，目標監測井依據動態因子分析成果，所篩選出最佳影響水井數量及其水井最遠距離彙整如表5-2所示，而每口目標監測井對於砷濃度變化而言，其周遭最佳影響水井名單及其距離如表5-3~表5-10所示。

表5-2、目標監測井之動態因子分析最佳結果及基本資料彙整表

| 監測井<br>名稱             | 東興<br>國小 | 大村<br>國中 | 新寶<br>國小 | 華龍<br>國小 | 溪湖<br>國小 | 台西<br>國小 | 文光國小<br>湖口分校 | 橋頭<br>國小 | 大同<br>國小 |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| 周遭最佳影響<br>水井數量        | 27       | 29       | 44       | 24       | 31       | 42       | 30           | 31       | 34       |
| 周遭最佳影響水井<br>之最遠距離(公尺) | 268      | 474      | 667      | 200      | 325      | 593      | 865          | 279      | 212      |
| LOG<br>Likelihood     | 22.042   | 22.455   | 23.845   | 23.029   | 31.083   | 28.202   | 17.011       | 11.846   | 25.179   |
| AIC                   | 15.916   | 19.089   | 46.311   | 7.941    | 5.834    | 33.595   | 31.978       | 44.308   | 23.643   |
| BIC                   | 57.952   | 66.978   | 132.257  | 40.851   | 55.67    | 113.884  | 81.363       | 95.19    | 83.246   |
| CAIC                  | 87.952   | 98.978   | 179.257  | 67.851   | 89.67    | 158.884  | 114.363      | 129.19   | 120.246  |

表5-3、東興國小目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 1  | 41-4629-27 | 13.73        | 15 | 41-3896-35 | 211.09       |
| 2  | 41-4629-28 | 38.45        | 16 | 41-4640-16 | 212.82       |
| 3  | 41-4620-02 | 49.50        | 17 | 41-4640-11 | 215.76       |
| 4  | 41-4618-07 | 51.47        | 18 | 41-4688-00 | 231.07       |
| 5  | 41-4618-04 | 68.16        | 19 | 41-4640-05 | 232.30       |
| 6  | 41-4618-01 | 71.49        | 20 | 41-4558-04 | 234.21       |
| 7  | 41-4618-09 | 99.95        | 21 | 41-3896-36 | 238.43       |
| 8  | 41-4625-00 | 135.96       | 22 | 41-4641-00 | 238.94       |
| 9  | 41-4626-00 | 156.03       | 23 | 41-4657-22 | 250.63       |
| 10 | 41-4618-10 | 156.38       | 24 | 41-3896-33 | 252.91       |
| 11 | 41-4618-12 | 164.90       | 25 | 41-4558-10 | 259.15       |
| 12 | 41-4631-01 | 171.28       | 26 | 41-4705-21 | 266.37       |



建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 13 | 41-3936-25 | 199.93       | 27 | 41-3939-01 | 267.89       |
| 14 | 41-4640-18 | 209.37       |    |            |              |

表5-4、大村國中目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 1  | 52-1579-48 | 139.98       | 16 | 52-1579-06 | 377.06       |
| 2  | 52-1749-25 | 171.08       | 17 | 52-1566-00 | 379.21       |
| 3  | 52-1750-50 | 187.17       | 18 | 52-1878-05 | 380.68       |
| 4  | 52-1749-15 | 188.87       | 19 | 52-1579-08 | 381.31       |
| 5  | 52-1548-53 | 219.07       | 20 | 52-1556-00 | 406.99       |
| 6  | 52-1548-55 | 230.37       | 21 | 52-1764-10 | 416.02       |
| 7  | 52-1678-40 | 275.12       | 22 | 52-1764-17 | 418.02       |
| 8  | 52-1579-09 | 291.12       | 23 | 52-3039-02 | 436.15       |
| 9  | 52-1850-47 | 292.41       | 24 | 52-1531-68 | 439.89       |
| 10 | 52-1579-02 | 292.89       | 25 | 52-1901-13 | 464.25       |
| 11 | 52-1548-12 | 314.87       | 26 | 52-3111-00 | 464.57       |
| 12 | 52-1892-25 | 333.93       | 27 | 52-3114-00 | 465.09       |
| 13 | 52-1579-05 | 353.72       | 28 | 52-1875-70 | 467.51       |
| 14 | 52-1579-04 | 358.35       | 29 | 52-3112-00 | 474.45       |
| 15 | 52-1870-61 | 375.69       |    |            |              |

表5-5、新寶國小目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 1  | 60-4140-00 | 169.52       | 23 | 60-0689-18 | 492.31       |
| 2  | 60-4131-00 | 199.92       | 24 | 60-4125-01 | 498.72       |
| 3  | 60-4139-00 | 218.70       | 25 | 60-4126-01 | 507.18       |
| 4  | 60-4003-00 | 293.33       | 26 | 60-4009-05 | 508.18       |
| 5  | 60-4130-01 | 296.25       | 27 | 60-4017-00 | 514.88       |
| 6  | 60-4148-04 | 313.91       | 28 | 60-0640-01 | 527.28       |
| 7  | 60-0657-01 | 328.52       | 29 | 60-4009-00 | 529.94       |
| 8  | 60-4159-50 | 350.90       | 30 | 60-4007-00 | 534.49       |
| 9  | 60-4123-01 | 404.38       | 31 | 60-4039-01 | 540.42       |
| 10 | 60-4033-00 | 407.00       | 32 | 60-0714-25 | 542.54       |
| 11 | 60-0679-04 | 423.92       | 33 | 60-4010-00 | 556.05       |
| 12 | 60-0680-00 | 424.42       | 34 | 60-4002-00 | 566.22       |
| 13 | 60-0671-00 | 425.45       | 35 | 60-0714-30 | 571.70       |
| 14 | 60-0649-00 | 428.56       | 36 | 60-3730-00 | 575.55       |
| 15 | 60-0662-02 | 429.85       | 37 | 60-4118-00 | 579.65       |
| 16 | 60-4149-01 | 444.57       | 38 | 60-3724-06 | 599.79       |
| 17 | 60-4005-01 | 456.38       | 39 | 60-4015-00 | 623.88       |
| 18 | 60-4035-01 | 456.48       | 40 | 60-3849-00 | 644.64       |
| 19 | 60-4119-00 | 468.20       | 41 | 60-3750-00 | 651.88       |
| 20 | 60-4150-09 | 487.07       | 42 | 60-4127-00 | 654.10       |
| 21 | 60-4016-01 | 488.36       | 43 | 60-3853-00 | 662.88       |
| 22 | 60-0656-00 | 488.82       | 44 | 60-4117-00 | 666.52       |



表5-6、華龍國小目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 1  | 84-5024-00 | 50.17        | 13 | 84-4874-25 | 170.07       |
| 2  | 84-5027-00 | 66.07        | 14 | 84-5096-20 | 174.51       |
| 3  | 84-5100-10 | 86.58        | 15 | 84-5105-00 | 177.29       |
| 4  | 84-5027-10 | 91.58        | 16 | 84-5056-00 | 179.11       |
| 5  | 84-5028-00 | 97.39        | 17 | 84-4890-30 | 182.19       |
| 6  | 84-5032-00 | 112.38       | 18 | 84-5101-21 | 187.05       |
| 7  | 84-5096-18 | 116.51       | 19 | 84-5101-15 | 188.65       |
| 8  | 84-5105-06 | 147.04       | 20 | 84-5101-10 | 194.04       |
| 9  | 84-5099-00 | 152.89       | 21 | 84-4873-00 | 197.20       |
| 10 | 84-5097-00 | 154.24       | 22 | 84-4874-23 | 198.60       |
| 11 | 84-5097-01 | 157.62       | 23 | 84-5106-05 | 199.13       |
| 12 | 84-5105-05 | 166.89       | 24 | 84-4895-01 | 199.56       |

表5-7、溪湖國小目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 1  | 58-6362-02 | 72.54        | 17 | 57-9082-80 | 263.92       |
| 2  | 57-9371-00 | 80.94        | 18 | 57-9516-62 | 267.65       |
| 3  | 58-6394-00 | 100.23       | 19 | 57-7599-12 | 269.35       |
| 4  | 57-9516-91 | 144.50       | 20 | 58-9488-00 | 272.97       |
| 5  | 58-6275-00 | 153.41       | 21 | 57-7614-00 | 279.62       |
| 6  | 58-6273-00 | 157.87       | 22 | 57-9512-30 | 285.71       |
| 7  | 58-6273-03 | 159.29       | 23 | 57-5733-81 | 286.22       |
| 8  | 58-7070-00 | 162.16       | 24 | 58-7326-06 | 290.38       |
| 9  | 57-8002-00 | 208.46       | 25 | 57-7437-00 | 290.88       |
| 10 | 57-9107-31 | 212.90       | 26 | 57-7510-03 | 302.86       |
| 11 | 57-9468-21 | 214.49       | 27 | 57-9515-03 | 304.38       |
| 12 | 57-9516-03 | 221.49       | 28 | 57-7660-02 | 314.04       |
| 13 | 58-7016-00 | 222.27       | 29 | 58-9415-18 | 319.31       |
| 14 | 57-9501-07 | 236.59       | 30 | 57-7310-00 | 320.39       |
| 15 | 58-7151-00 | 241.60       | 31 | 57-9512-33 | 324.82       |
| 16 | 58-8252-08 | 247.21       |    |            |              |

表5-8、台西國小目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 1  | 62-0750-20 | 94.99        | 22 | 62-1220-00 | 414.24       |
| 2  | 62-1794-00 | 140.48       | 23 | 62-1258-17 | 430.13       |
| 3  | 62-0911-18 | 217.53       | 24 | 62-0306-29 | 465.81       |
| 4  | 62-2175-10 | 225.99       | 25 | 62-1999-12 | 469.10       |
| 5  | 62-2410-12 | 230.42       | 26 | 62-0306-31 | 470.59       |
| 6  | 62-0912-18 | 243.51       | 27 | 62-0077-39 | 490.26       |
| 7  | 62-0912-14 | 257.34       | 28 | 62-0306-30 | 491.30       |
| 8  | 62-0751-17 | 268.61       | 29 | 62-0341-28 | 499.43       |
| 9  | 62-0268-26 | 322.03       | 30 | 62-1258-12 | 499.98       |
| 10 | 62-2349-00 | 333.92       | 31 | 62-0254-13 | 509.99       |



# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 11 | 62-0253-56 | 340.91       | 32 | 62-2085-00 | 510.53       |
| 12 | 62-2351-19 | 356.92       | 33 | 62-0086-26 | 511.21       |
| 13 | 62-1258-11 | 363.91       | 34 | 62-1250-10 | 513.33       |
| 14 | 62-0306-00 | 378.84       | 35 | 62-0253-75 | 523.64       |
| 15 | 62-2003-50 | 389.04       | 36 | 62-1253-15 | 525.88       |
| 16 | 62-1213-00 | 389.35       | 37 | 62-2268-18 | 527.30       |
| 17 | 62-0253-58 | 391.08       | 38 | 62-0347-21 | 528.31       |
| 18 | 62-1245-07 | 392.14       | 39 | 62-0347-20 | 550.90       |
| 19 | 62-0306-03 | 401.53       | 40 | 62-1655-34 | 560.71       |
| 20 | 62-0253-78 | 402.76       | 41 | 62-0253-83 | 579.69       |
| 21 | 62-0254-11 | 413.73       | 42 | 62-1258-15 | 593.08       |

表5-9、文光國小湖口分校目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 1  | 50-5012-00 | 239.28       | 16 | 50-5828-10 | 774.74       |
| 2  | 50-5300-00 | 424.35       | 17 | 50-5759-10 | 785.08       |
| 3  | 50-5313-10 | 502.96       | 18 | 50-5510-00 | 804.16       |
| 4  | 50-5773-10 | 530.57       | 19 | 50-5758-00 | 819.73       |
| 5  | 50-5320-10 | 536.13       | 20 | 50-5331-10 | 830.29       |
| 6  | 50-5231-13 | 539.98       | 21 | 50-5328-10 | 834.41       |
| 7  | 50-5317-10 | 541.94       | 22 | 50-6014-00 | 843.75       |
| 8  | 50-5325-10 | 581.55       | 23 | 50-5514-10 | 844.06       |
| 9  | 50-5771-00 | 585.77       | 24 | 50-6013-10 | 850.13       |
| 10 | 50-5376-10 | 593.73       | 25 | 50-5942-10 | 852.28       |
| 11 | 50-5824-10 | 654.00       | 26 | 50-5690-00 | 855.98       |
| 12 | 50-5320-20 | 665.34       | 27 | 50-5512-10 | 856.05       |
| 13 | 50-5728-00 | 665.88       | 28 | 50-5336-10 | 858.34       |
| 14 | 50-5761-10 | 683.69       | 29 | 50-5539-10 | 865.12       |
| 15 | 50-5379-10 | 761.28       | 30 | 50-5523-10 | 865.39       |

表5-10、橋頭國小目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井距離(公尺) |
|----|------------|--------------|----|------------|--------------|
| 1  | 91-0242-26 | 62.95        | 17 | 91-0843-51 | 210.96       |
| 2  | 91-0242-27 | 91.81        | 18 | 91-0188-34 | 214.34       |
| 3  | 91-0242-25 | 113.35       | 19 | 91-0257-21 | 225.92       |
| 4  | 91-0242-65 | 141.13       | 20 | 91-0921-00 | 232.39       |
| 5  | 91-0806-00 | 151.55       | 21 | 91-0244-67 | 233.38       |
| 6  | 91-0245-01 | 156.08       | 22 | 91-0244-74 | 235.39       |
| 7  | 91-0242-30 | 162.20       | 23 | 91-0245-10 | 243.67       |
| 8  | 91-0187-10 | 165.96       | 24 | 91-0245-90 | 251.21       |
| 9  | 91-0207-00 | 170.68       | 25 | 91-0244-71 | 258.10       |
| 10 | 91-0243-20 | 180.78       | 26 | 91-0286-02 | 261.89       |
| 11 | 91-0206-57 | 180.96       | 27 | 91-0244-88 | 265.35       |
| 12 | 91-0257-19 | 184.86       | 28 | 91-0244-86 | 268.46       |
| 13 | 91-0245-05 | 188.08       | 29 | 91-0244-76 | 271.66       |
| 14 | 91-0916-01 | 189.44       | 30 | 91-0244-83 | 275.52       |
| 15 | 91-0825-00 | 191.28       | 31 | 91-0244-73 | 278.78       |
| 16 | 91-0256-50 | 208.95       |    |            |              |



表5-11、大同國小目標監測井最佳影響水井及距離名單

| 編號 | 水井編號         | 水井與監測井<br>距離(公尺) | 編號 | 水井編號       | 水井與監測井<br>距離(公尺) |
|----|--------------|------------------|----|------------|------------------|
| 1  | 90-9799-84   | 82.87            | 18 | 90997500   | 162.78           |
| 2  | 90951100     | 85.39            | 19 | 90951900   | 167.73           |
| 3  | 90-9515-07   | 106.75           | 20 | 90-9442-10 | 168.71           |
| 4  | 90951505     | 122.10           | 21 | 90919100   | 169.01           |
| 5  | 90998983     | 128.96           | 22 | 90918200   | 170.23           |
| 6  | 90997300     | 135.04           | 23 | 90944440   | 170.98           |
| 7  | 98160883     | 136.44           | 24 | 90-9976-00 | 174.79           |
| 8  | 90-9181-00   | 136.44           | 25 | 90999420   | 175.69           |
| 9  | 90-0853-00   | 136.44           | 26 | 90951910   | 178.56           |
| 10 | 90951550     | 136.72           | 27 | 90951800   | 181.74           |
| 11 | 90-8389-00   | 136.98           | 28 | 90-9516-00 | 183.79           |
| 12 | 90918700     | 138.32           | 29 | 90914700   | 187.56           |
| 13 | 90-9515-01-2 | 140.06           | 30 | 90996600   | 202.41           |
| 14 | 90-9971-00   | 141.22           | 31 | 90-9977-00 | 208.16           |
| 15 | 90-9563-00   | 146.46           | 32 | 90996800   | 208.26           |
| 16 | 90-9516-05   | 150.28           | 33 | 90-9443-20 | 211.84           |
| 17 | 90951610     | 153.83           | 34 | 90-9443-00 | 212.14           |

本計畫為更進一步釐清監測井砷濃度與周遭水井用電量之關係，故彙整監測井基本資料，包括水力傳導係數及井深等(如表5-12所示)，期望找出目標監測井周遭最佳影響水井之重要關鍵因子，故以雙變數相關性分析，找出彼此間之相關性及顯著性，分析結果如表5-13所示，顯示監測井周遭最佳影響水井距離與其水力傳導係數呈現顯著正相關，而與井深呈現顯著負相關，另由圖5-17之散布圖亦顯示同樣結果，此結果符合傳統水文地質背景狀況，以水力傳導係數而言，監測井之水力傳導係數越大，代表地層透水性越好，故可以影響週遭的抽水井範圍越大；而以井深而言，監測井之井深越深，代表地下水越不易受到表層水體影響，故可以影響週遭的抽水井範圍則越小。

表5-12、目標監測井基本資料與最佳影響電表資訊彙整表

| 監測井名稱    | 水力傳導係數<br>(m/s) | 井深<br>(公尺) | 周遭最佳影響<br>水井數量 | 周遭最佳影響水井<br>之最遠距離(公尺) |
|----------|-----------------|------------|----------------|-----------------------|
| 東興國小     | 0.000055        | 15.32      | 27             | 268                   |
| 大村國中     | 0.0000174       | 11.44      | 29             | 474                   |
| 新寶國小     | 0.000229        | 6.50       | 44             | 667                   |
| 華龍國小     | 0.00000241      | 15.64      | 24             | 200                   |
| 溪湖國小     | 0.000148        | 12.81      | 31             | 325                   |
| 台西國小     | 0.000161        | 8.10       | 42             | 593                   |
| 文光國小湖口分校 | 0.0004069       | 9.35       | 30             | 865                   |



# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

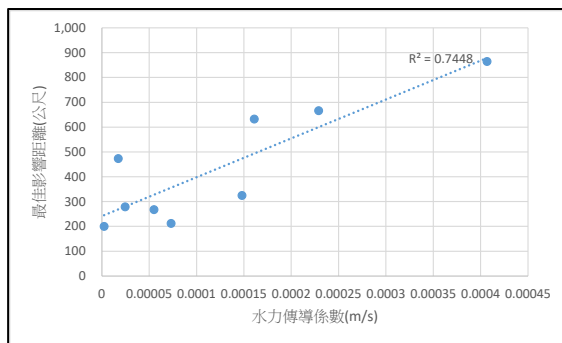
| 監測井名稱 | 水力傳導係數<br>(m/s) | 井深<br>(公尺) | 周遭最佳影響<br>水井數量 | 周遭最佳影響水井<br>之最遠距離(公尺) |
|-------|-----------------|------------|----------------|-----------------------|
| 橋頭國小  | 0.0000246       | 9.00       | 31             | 279                   |
| 大同國小  | 0.0000731       | 16.00      | 34             | 212                   |

表5-13、目標監測井基本資料與最佳影響電表資訊相關性分析

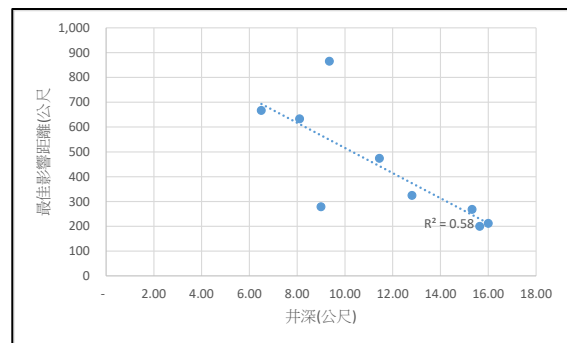
| 相關性分析         |            | 水力傳導係數  | 井深      | 周遭最佳影響水井數量 | 周遭最佳影響水井之最遠距離 |
|---------------|------------|---------|---------|------------|---------------|
| 水力傳導係數        | Pearson 相關 | 1       | -0.530  | 0.387      | 0.871**       |
|               | 顯著性(單尾)    | —       | 0.142   | 0.303      | 0.002         |
| 井深            | Pearson 相關 | -0.530  | 1       | -0.701*    | -0.753*       |
|               | 顯著性(單尾)    | 0.142   | —       | 0.035      | 0.019         |
| 周遭最佳影響水井數量    | Pearson 相關 | 0.387   | -0.701* | 1          | 0.481         |
|               | 顯著性(單尾)    | 0.303   | 0.035   | —          | 0.190         |
| 周遭最佳影響水井之最遠距離 | Pearson 相關 | 0.871** | -0.753* | 0.481      | 1             |
|               | 顯著性(單尾)    | 0.002   | 0.019   | 0.190      | —             |

\*\*、在顯著水準為0.01時(單尾)，相關顯著。

\*、在顯著水準為0.05時(單尾)，相關顯著。



(a)水力傳導係數



(b)井深

圖5-17、目標監測井周遭水井最佳影響距離與監測井基本資料散布圖

## 四、目標監測井周遭最佳影響水井之總用電量分析

本計畫為釐清砷濃度趨勢與用電量趨勢，故將每口監測井周遭最佳影響水井數量之電量結果加總，彰化縣5口監測井周遭最佳影響水井之總用電量如圖5-18所示，雲林縣4口監測井周遭最佳影響水井之總用電量如圖5-19所示，顯示監測井周遭最佳電表總電量相加後，亦有隨季節波動情形，另由不同季節之總電量來看(如圖5-20所示)，以第1、4季總電量普遍較低、第2、3季總電量普遍較高，其用電量趨勢與豐、枯水期結果一致，說明在豐水期之農業用水需求增加，故水表之總用電量較高，而地下水相對處於較氧化狀態，故此時期之砷濃度相對較低。





## 第五章 結果與討論

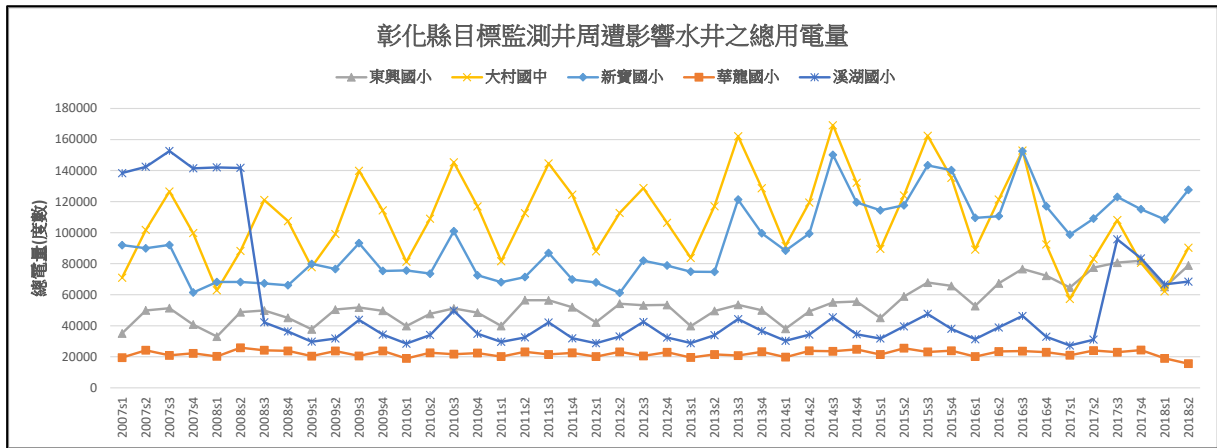


圖5-18、彰化縣目標監測井周遭影響水井之總用電量趨勢圖

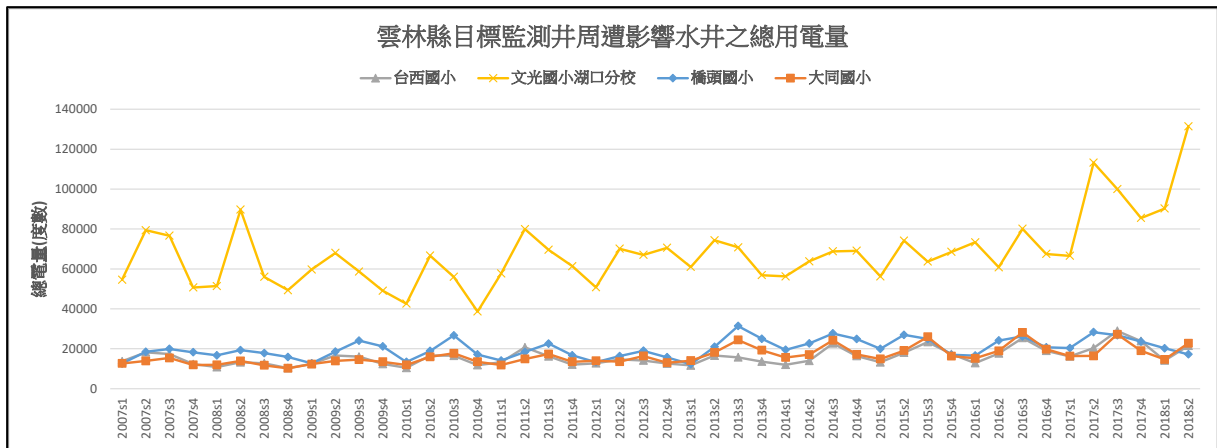


圖5-19、雲林縣目標監測井周遭影響水井之總用電量趨勢圖

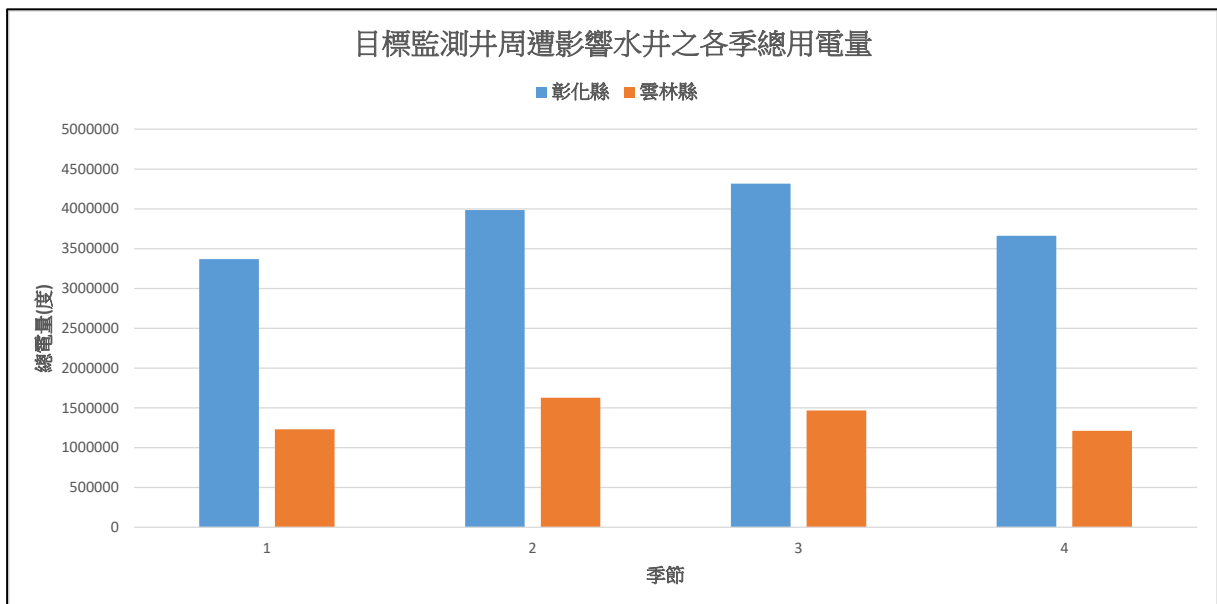


圖5-20、彰化縣及雲林縣目標監測井周遭影響水井之各季總用電量



## 五、目標監測井之砷濃度動態因子分析

本計畫目標監測井之動態因子分析成果如圖5-21~圖5-29所示，顯示若砷濃度變化跳動較大且監測資料無間斷者，例如彰化縣新寶國小(圖5-23)、雲林縣台西國小(圖5-26)，其分析結果與實際結果之擬合度較高，而其他監測井之砷濃度較無明顯變化者或監測井資料缺漏值較多者，其分析結果與實際結果之擬合度則較低。為有效提升砷濃度預測成果，故本計畫後續將嘗試利用不同類型之機器學習模型進行砷濃度之預測分析。

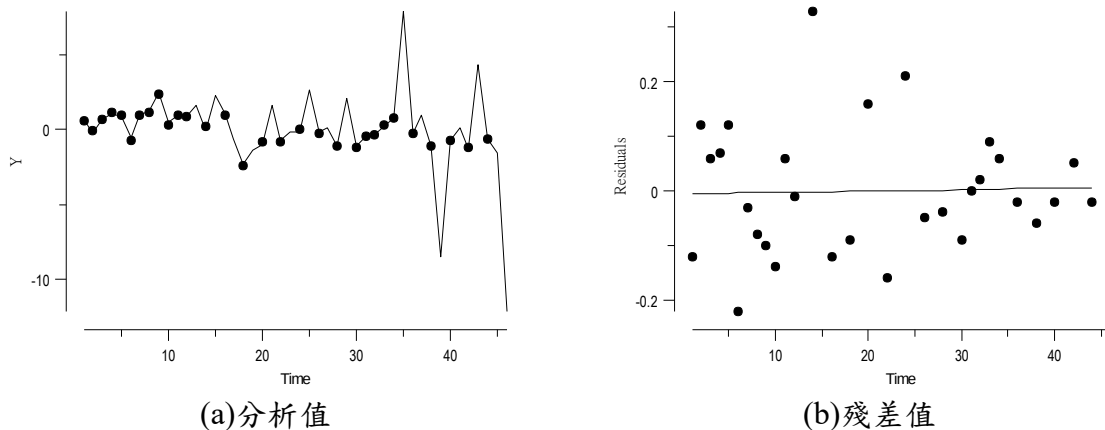


圖5-21、彰化縣東興國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖

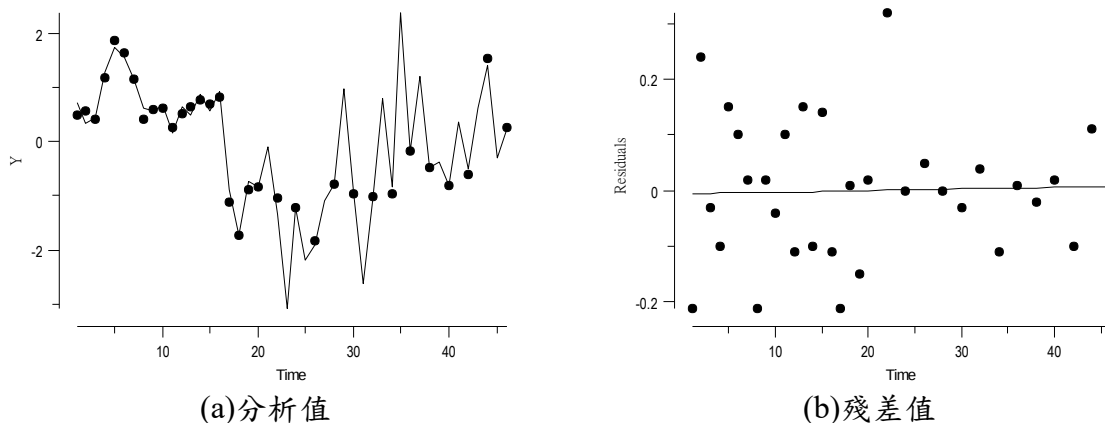


圖5-22、彰化縣大村國中監測井砷濃度之動態因子分析成果圖



第五章 結果與討論

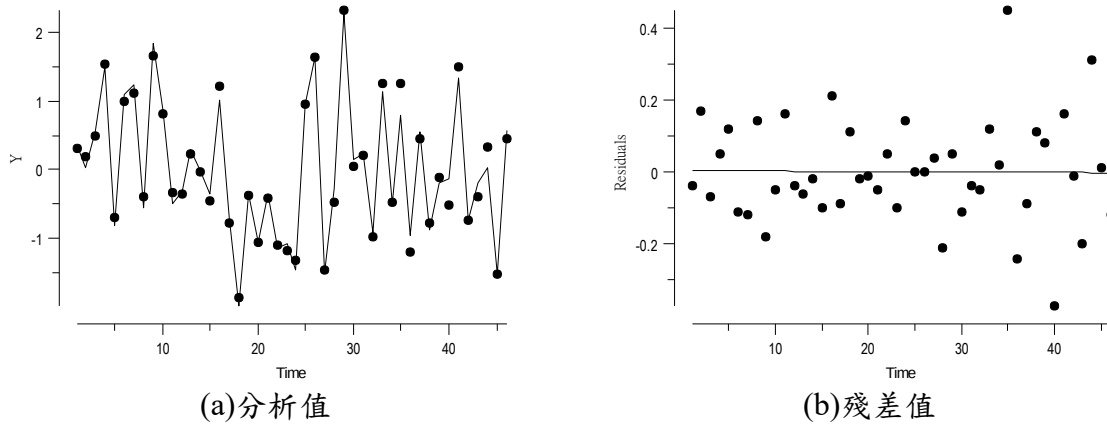


圖5-23、彰化縣新寶國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖

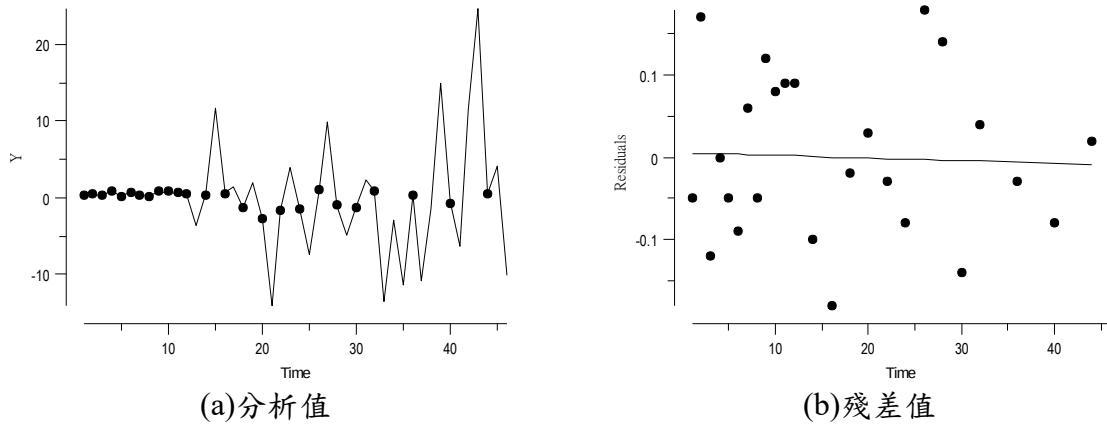


圖5-24、彰化縣華龍國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖

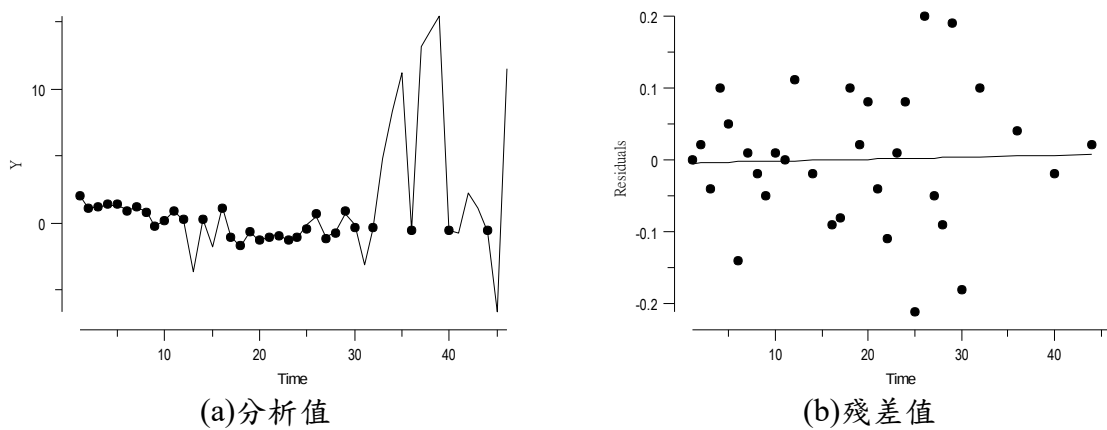


圖5-25、彰化縣溪湖國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖



建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

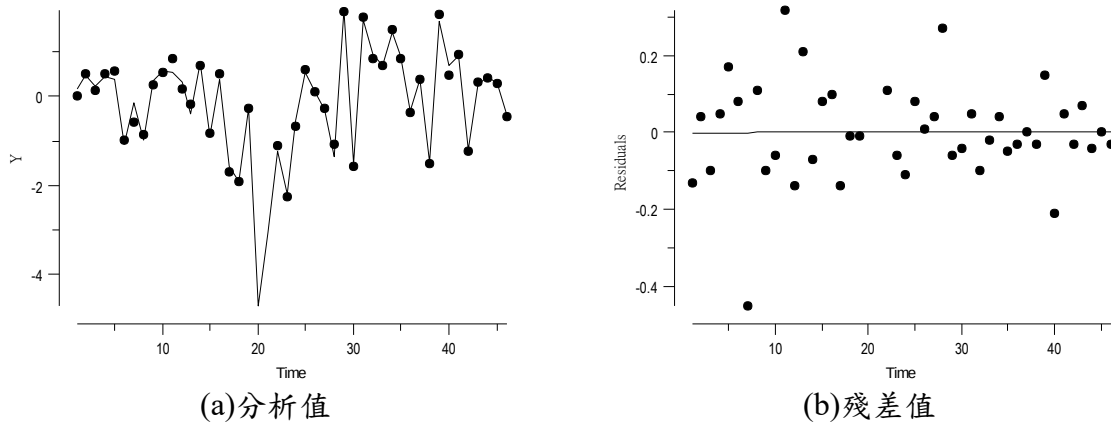


圖5-26、雲林縣台西國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖

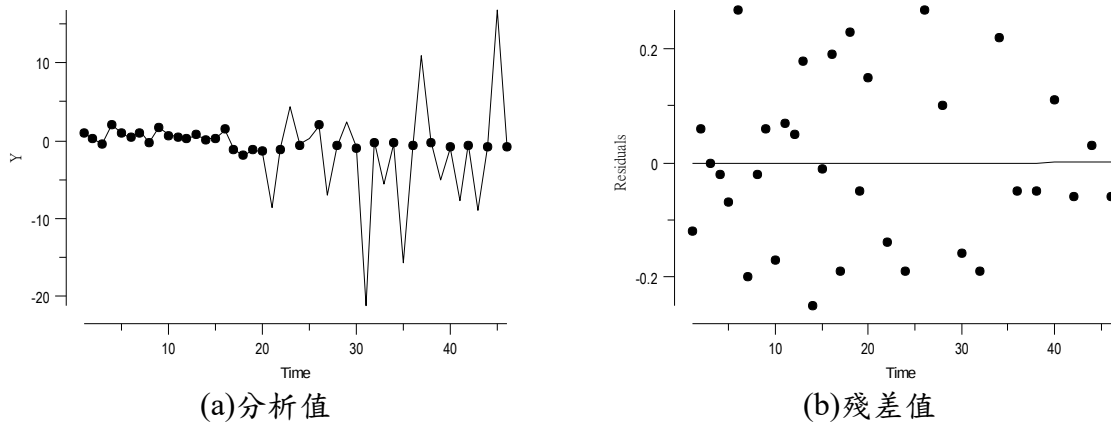


圖5-27、雲林縣文光國小湖口分校監測井砷濃度之動態因子分析成果圖

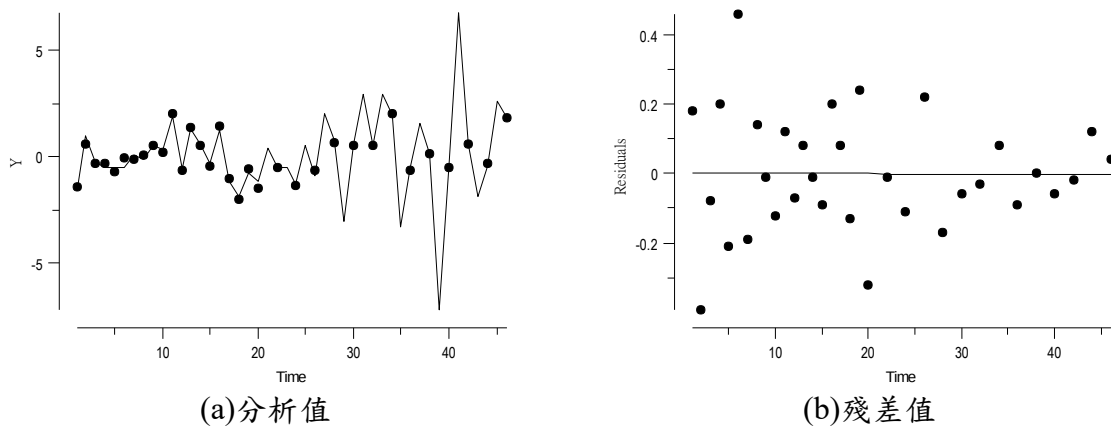


圖5-28、雲林縣橋頭國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖

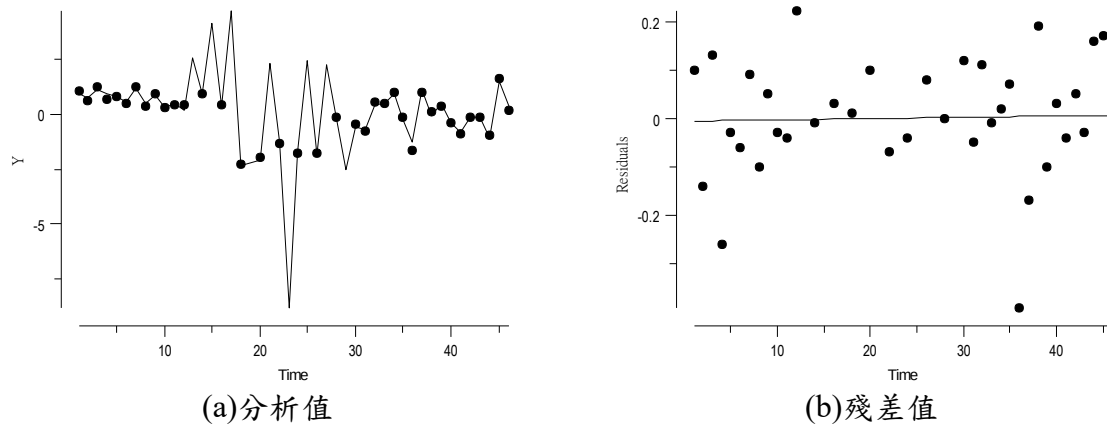


圖5-29、雲林縣大同國小監測井砷濃度之動態因子分析成果圖

## 六、小結

由於地下水砷濃度易受氧化還原環境影響而導致變動情形，而臺灣地下水井數量龐大，其抽水行為極易造成地下水氧化還原條件變化，以本計畫研究區域而言，在豐水期之地下水砷濃度較低，與周遭抽水井之用電量較大有明顯正相關，且本研究區域以農業為主，因此，在砷濃度最低之年度(2012年)，其周遭抽水行為較其他年度大，本計畫亦彙整歷年水稻產量，顯示在該年度亦有較高情形發生。

綜上所述，本計畫推測地下水砷濃度變化與周遭抽水井之抽水行為、用電量、水稻產量等息息相關，本計畫雖已歸納抽水距離與水力傳導係數呈現顯著正相關、而與井深呈現顯著負相關，然由於動態因子分析需多次嘗試才能找出每口監測井周遭之最佳影響抽水井數量及距離，且由本計畫結果顯示其最佳距離及數量皆不一致，為了提升地下水砷濃度預測擬合度及效率，故後續嘗試以機器學習方式進行砷濃度預測工作。



## 5.4 機器學習預測模型建立成果

### 一、模型建置使用資料說明

#### (一) 監測井資料

##### 1. 基本資料

濁水溪沖積扇之環保署區域性監測井共計41口，包括彰化縣23口、雲林縣18口，扣除無連續監測資料之監測井後，分別為彰化縣18口、雲林縣17口，共計35口監測井，每口監測井資訊包括座標、設置日期、深度、水位等。

##### 2. 水質資料

監測井水質資料的時間區間為2000年至2019年，每季、每半年或每一年一筆資料，每筆水質資料包括採樣日期、砷濃度(mg/L)、總有機碳(mg/L)、鐵(mg/L)、錳(mg/L)、氧化還原電位(mV)與酸鹼值等水質參數，本計畫優先以砷濃度(mg/L)資料為目標。

#### (二) 抽水井用電

##### 1. 基本資料

濁水溪沖積扇區域的抽水井共計242,711口，包括彰化縣125,941口、雲林縣116,770口，每一口抽水井資訊包含水井編號、電錶號、位置座標、日期、所屬政府等，其中有分專用電錶及非專用電錶的抽水井。在資料前處理時，本計畫已發現一個電錶可能配到多口抽水井，也就是說一個電錶所記錄的用電度數是由多口抽水井用電抽水累計而成的，由於研究資料是從抽水井轉成電錶，於是將座標位置進行前處理，包含(1)一個電錶搭配一個抽水井的情況，電錶就繼承原本抽水井的座標位置。(2)一個電錶配到多口抽水井的情況，則將多口抽水井的座標(X 和 Y 值)各別加總後取平均，即得到新的電錶座標。而本計畫所說的抽水井用電資料之座標，即是經處理過後的座標資訊。

##### 2. 用電資料

抽水井用電資料的時間區間為2007年1月到2018年6月之單(雙)數月或每一個月，本計畫考量抽水行為皆會造成地下水變動，故並未排除非專用電錶，而是將所有電錶的用電資料都納入。





### (三) 氣象局自動測站資料

#### 1. 基本資料

濁水溪沖積扇區域的氣象局自動測站共計48口，包括彰化縣24口、雲林縣24口，扣除無資料測站後共計37口，分別為彰化縣21口、雲林縣16口，每一個氣象局自動測站資訊包含站號、經緯度座標、設站與撤站日期等。

#### 2. 雨量資料

氣象局自動測站雨量資料的時間區間為2007年1月到2018年9月，每一小時一筆資料，所以採用累積雨量，整合成一個月一筆雨量資料。

## 二、模型建置資料資料前處理成果

### (一) 監測井水質資料

以濁水溪沖積扇區域性監測井的砷濃度資料為主，彰化縣18口及雲林縣17口，共計35口監測井，砷濃度資料共有2,284筆，分別為彰化縣1,291筆、雲林縣993筆，扣除沒有監測井資料和無砷濃度資料筆數後，彰化縣剩餘1,006筆、雲林縣剩餘782筆，共1,788筆資料，並把砷濃度低於偵測極限者修正為0。

### (二) 彰化雲林地區抽水井

在濁水溪沖積扇區域的不分電錶抽水井在彰化及雲林地區共計242,711口，包括彰化125,941口、雲林地區116,770口，專用電錶共計171,293口，包括彰化78,864口、雲林地區92,429口。

### (三) 目標監測井周圍之抽水井

根據上述9口目標監測井，利用監測井及抽水井的座標，找出每一口監測井周圍最近的50、100、200、400、800口抽水井用電量當作特徵，成分專用電錶及不分電錶。

### (四) 特徵資料綜整說明

本計畫根據砷濃度資料的採樣日期，回推前一個月跟前兩個月的用電資料加總當作特徵，例如砷濃度為2018年5月的資料，就會把所選到的抽水井2018年4月跟3月的用電電量加總當作特徵。最後把監測井名稱、



## 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

採樣日期、砷濃度資料跟用電資料合併一起，並把選用到的用電量值為空值的補上0。

### 三、成果說明

#### (一) 目標監測井資料呈現

表5-14~表5-16為本研究選取9口目標監測井分別為台西國小、東興國小(彰化縣)、新寶國小、大村國中、文光國小湖口分校、橋頭國小、大同國小(雲林縣)、華龍國小(彰化縣)以及溪湖國小，以下為本次研究標的之基本統計資料，包含研究時間區間、資料筆數、砷濃度最大值、平均值以及最小值，其中時間區間為監測井中的砷濃度去匹配抽水井用電量有資料的時間區間，並非監測井砷濃度的所有資料區間。

表5-14、變化跳動大之目標監測井基本資料

| 監測井名稱  | 台西國小                    | 新寶國小                    |
|--------|-------------------------|-------------------------|
| 時間區間   | 2007-05-15 ~ 2018-04-23 | 2007-05-10 ~ 2018-04-20 |
| 資料筆數   | 43                      | 45                      |
| 砷濃度最大值 | 0.1460                  | 0.0589                  |
| 砷濃度平均值 | 0.0838                  | 0.0328                  |
| 砷濃度最小值 | 0.0089                  | 0.0084                  |

表5-15、變化跳動小且偶有超標之目標監測井基本資料

| 監測井名稱  | 大村國中                       | 文光國小<br>湖口分校               | 東興國小<br>(彰化縣)              | 橋頭國小                       |
|--------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 時間區間   | 2007-05-16 ~<br>2018-04-26 | 2007-05-15 ~<br>2018-04-16 | 2007-05-08 ~<br>2017-10-12 | 2007-05-17 ~<br>2018-04-23 |
| 資料筆數   | 32                         | 32                         | 30                         | 32                         |
| 砷濃度最大值 | 0.0697                     | 0.0365                     | 0.0866                     | 0.0328                     |
| 砷濃度平均值 | 0.0364                     | 0.0207                     | 0.0514                     | 0.0192                     |
| 砷濃度最小值 | 0.0042                     | 0.0075                     | 0.0095                     | 0.0054                     |

表5-16、變化跳動小且大部分未超標之目標監測井基本資料

| 監測井名稱  | 大同國小(雲林縣)                   | 華龍國小(彰化縣)                   | 溪湖國小                        |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 時間區間   | 2007-05-17 ~ 2018-<br>04-23 | 2007-05-17 ~ 2017-<br>10-16 | 2007-05-16 ~ 2017-<br>10-13 |
| 資料筆數   | 36                          | 24                          | 31                          |
| 砷濃度最大值 | 0.0271                      | 0.0301                      | 0.0287                      |
| 砷濃度平均值 | 0.0172                      | 0.0209                      | 0.0161                      |
| 砷濃度最小值 | 0.0038                      | 0.0000                      | 0.0022                      |



## (二) 目標監測井之機器學習成果

表5-17~表5-25分別為9口目標監測井以周圍最近50、100、200、400及800口分別考量專用電錶及不分電錶單獨建置預測模型，模型包含線性迴歸、支持向量機、隨機森林、人工神經網路等4種模型進行測試，並以MAE、MSE、 $R^2$ 、COR等4種指標進行評估之機器學習演算成果，其中以人工神經網路在各口監測井之評估指標皆優於線性迴歸、支持向量機、隨機森林等3種模型，說明人工神經網路對於地下水砷濃度預測有不錯的表現，另由圖5-30~圖5-37變化跳動大之監測井(台西國小及新寶國小)機器學習結果為例，觀察模型之預測值及實際值之變化情形，顯示線性迴歸及支持向量機預測效果不好，在真實值較低的情況其預測值反而較高，而隨機森林預測值跳動範圍較小(約0.02 mg/L)，人工神經網路預測相對較好，然而因本研究砷濃度預測筆數有限，因此有過擬合的可能性，建議未來在增加砷濃度檢測值後再進行更多測試。

表5-17、台西國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果

| 模型     | 評估指標  | 50     |        | 100    |        | 200    |        | 400    |        | 800    |        |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        |       | 專用電表   | 不分電表   | 專用電表   | 不分電表   | 專用電表   | 不分電表   | 專用電表   | 不分電表   | 專用電表   | 不分電表   |
| 線性迴歸   | MAE   | 0.033  | 0.028  | 0.027  | 0.029  | 0.027  | 0.026  | 0.029  | 0.028  | 0.028  | 0.028  |
|        | MSE   | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  |
|        | COR   | -0.746 | -0.239 | -0.134 | -0.743 | -0.514 | -0.171 | -0.298 | -0.349 | -0.135 | -0.576 |
|        | $R^2$ | 0.495  | 0.485  | 0.692  | 0.665  | 0.209  | 0.436  | 0.704  | 0.387  | 0.73   | 0.428  |
| 支持向量機  | MAE   | 0.027  | 0.028  | 0.028  | 0.027  | 0.026  | 0.026  | 0.025  | 0.024  | 0.026  | 0.025  |
|        | MSE   | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.0008 | 0.001  | 0.001  |
|        | COR   | -0.273 | -0.211 | -0.386 | -0.280 | -0.224 | -0.208 | -0.077 | 0.012  | -0.236 | -0.138 |
|        | $R^2$ | 0.192  | 0.609  | 0.111  | 0.436  | 0.205  | 0.375  | 0.472  | 0.411  | 0.335  | 0.332  |
| 隨機森林   | MAE   | 0.027  | 0.024  | 0.027  | 0.026  | 0.026  | 0.025  | 0.025  | 0.025  | 0.024  | 0.025  |
|        | MSE   | 0.001  | 0.0009 | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 | 0.0009 |
|        | COR   | -0.154 | 0.119  | -0.071 | -0.002 | -0.049 | 0.019  | -0.029 | 0.030  | -0.013 | -0.003 |
|        | $R^2$ | -0.400 | 0.834  | 0.454  | 0.465  | 0.321  | 0.409  | 0.389  | 0.205  | 0.242  | 0.195  |
| 人工神經網路 | MAE   | 0.009  | 0.012  | 0.010  | 0.010  | 0.011  | 0.011  | 0.014  | 0.013  | 0.015  | 0.014  |
|        | MSE   | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0002 | 0.0004 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0007 | 0.0005 |
|        | COR   | 0.661  | 0.659  | 0.653  | 0.721  | 0.610  | 0.452  | 0.402  | 0.534  | 0.364  | 0.535  |
|        | $R^2$ | 0.990  | 0.969  | 0.915  | 0.824  | 0.813  | 0.796  | 0.813  | 0.716  | 0.762  | 0.899  |

表5-18、東興國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果

| 模型    | 評估指標  | 50     |        | 100    |        | 200    |        | 400    |        | 800    |        |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       |       | 專用電表   | 不分電表   | 專用電表   | 不分電表   | 專用電表   | 不分電表   | 專用電表   | 不分電表   | 專用電表   | 不分電表   |
| 線性迴歸  | MAE   | 0.009  | 0.011  | 0.009  | 0.009  | 0.010  | 0.011  | 0.010  | 0.010  | 0.009  | 0.011  |
|       | MSE   | 0.0001 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0002 |
|       | COR   | 0.091  | -0.152 | 0.261  | 0.259  | 0.047  | -0.250 | 0.128  | 0.168  | 0.209  | 0.024  |
|       | $R^2$ | 0.924  | 0.571  | 0.936  | 0.940  | 0.889  | 0.913  | 0.943  | 0.903  | 0.936  | 0.778  |
| 支持向量機 | MAE   | 0.010  | 0.010  | 0.011  | 0.010  | 0.010  | 0.010  | 0.010  | 0.010  | 0.009  | 0.010  |
|       | MSE   | 0.0001 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 |
|       | COR   | 0.063  | 0.007  | 0.011  | 0.181  | 0.174  | 0.170  | 0.184  | 0.101  | 0.249  | 0.156  |



# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

|        |                |         |         |         |         |         |         |         |         |         |        |
|--------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
|        | R <sup>2</sup> | 0.809   | 0.724   | 0.730   | 0.808   | 0.877   | 0.801   | 0.884   | 0.848   | 0.884   | 0.862  |
| 隨機森林   | MAE            | 0.010   | 0.009   | 0.010   | 0.009   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.009   | 0.010   | 0.010  |
|        | MSE            | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001 |
|        | COR            | 0.320   | 0.381   | 0.321   | 0.328   | 0.312   | 0.292   | 0.268   | 0.350   | 0.304   | 0.246  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.922   | 0.934   | 0.901   | 0.992   | 0.967   | 0.982   | 0.947   | 0.883   | 0.943   | 0.956  |
| 人工神經網路 | MAE            | 0.004   | 0.004   | 0.004   | 0.004   | 0.003   | 0.005   | 0.004   | 0.004   | 0.005   | 0.008  |
|        | MSE            | 0.00006 | 0.00006 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00005 | 0.00006 | 0.00006 | 0.00006 | 0.00008 | 0.0001 |
|        | COR            | 0.506   | 0.500   | 0.463   | 0.335   | 0.592   | 0.484   | 0.642   | 0.528   | 0.478   | 0.251  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.947   | 0.998   | 0.934   | 0.933  |

表5-19、新寶國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果

| 模型     | 評估指標           | 50      |         | 100     |         | 200     |         | 400     |         | 800     |         |
|--------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        |                | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    |
| 線性迴歸   | MAE            | 0.011   | 0.012   | 0.010   | 0.010   | 0.013   | 0.010   | 0.013   | 0.011   | 0.011   | 0.010   |
|        | MSE            | 0.0001  | 0.0002  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0002  | 0.0001  | 0.0002  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  |
|        | COR            | -0.377  | -0.723  | -0.201  | -0.352  | -0.860  | -0.362  | -0.794  | -0.580  | -0.405  | -0.294  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.690   | 0.452   | 0.611   | 0.508   | 0.535   | 0.294   | -0.483  | 0.392   | -0.448  | 0.248   |
| 支持向量機  | MAE            | 0.010   | 0.011   | 0.010   | 0.011   | 0.010   | 0.009   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.011   |
|        | MSE            | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  |
|        | COR            | -0.238  | -0.453  | -0.144  | -0.364  | -0.183  | -0.074  | -0.147  | -0.140  | -0.132  | -0.337  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.325   | 0.565   | 0.513   | 0.260   | 0.196   | 0.360   | 0.152   | 0.251   | 0.148   | 0.102   |
| 隨機森林   | MAE            | 0.009   | 0.010   | 0.009   | 0.010   | 0.009   | 0.009   | 0.010   | 0.009   | 0.010   | 0.010   |
|        | MSE            | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  |
|        | COR            | -0.022  | -0.108  | -0.076  | -0.172  | -0.126  | -0.110  | -0.156  | -0.054  | -0.231  | -0.110  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.356   | 0.472   | 0.633   | 0.647   | 0.719   | 0.640   | 0.414   | 0.628   | 0.420   | 0.474   |
| 人工神經網路 | MAE            | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.002   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.004   |
|        | MSE            | 0.00004 | 0.00004 | 0.00003 | 0.00003 | 0.00003 | 0.00003 | 0.00003 | 0.00004 | 0.00003 | 0.00004 |
|        | COR            | 0.693   | 0.675   | 0.715   | 0.786   | 0.774   | 0.741   | 0.767   | 0.673   | 0.744   | 0.649   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.989   | 0.994   | 0.923   | 0.991   | 0.974   | 0.990   | 0.955   | 0.984   | 0.939   | 0.974   |

表5-20、大村國中預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果

| 模型     | 評估指標           | 50      |         | 100     |         | 200     |         | 400     |         | 800     |         |
|--------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        |                | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    |
| 線性迴歸   | MAE            | 0.015   | 0.012   | 0.011   | 0.011   | 0.014   | 0.014   | 0.011   | 0.012   | 0.012   | 0.010   |
|        | MSE            | 0.0003  | 0.0002  | 0.0002  | 0.0002  | 0.0002  | 0.0003  | 0.0001  | 0.0002  | 0.0002  | 0.0001  |
|        | COR            | -0.575  | 0.001   | 0.055   | 0.005   | -0.265  | -0.414  | 0.235   | -0.150  | 0.067   | 0.203   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.750   | 0.808   | 0.789   | 0.717   | 0.838   | 0.616   | 0.713   | 0.870   | 0.563   | 0.860   |
| 支持向量機  | MAE            | 0.011   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.011   | 0.009   | 0.011   | 0.009   |
|        | MSE            | 0.0002  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0002  | 0.0001  |
|        | COR            | 0.142   | 0.315   | 0.269   | 0.202   | 0.210   | 0.252   | 0.116   | 0.360   | 0.072   | 0.271   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.652   | 0.536   | 0.736   | 0.660   | 0.687   | 0.668   | 0.760   | 0.655   | 0.746   | 0.688   |
| 隨機森林   | MAE            | 0.012   | 0.010   | 0.011   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.010   | 0.010   |
|        | MSE            | 0.0002  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  | 0.0001  |
|        | COR            | 0.017   | 0.248   | 0.152   | 0.177   | 0.154   | 0.131   | 0.170   | 0.206   | 0.208   | 0.250   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.792   | 0.712   | 0.721   | 0.678   | 0.828   | 0.819   | 0.866   | 0.711   | 0.790   | 0.782   |
| 人工神經網路 | MAE            | 0.004   | 0.004   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.004   | 0.004   | 0.005   | 0.005   | 0.004   |
|        | MSE            | 0.00006 | 0.00006 | 0.00005 | 0.00006 | 0.00006 | 0.00006 | 0.00006 | 0.00007 | 0.00008 | 0.00007 |
|        | COR            | 0.728   | 0.760   | 0.768   | 0.718   | 0.725   | 0.734   | 0.749   | 0.698   | 0.643   | 0.682   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.907   | 0.963   | 0.995   | 0.972   | 0.961   | 0.943   | 0.978   | 0.976   | 0.922   | 0.943   |



表5-21、文光國小湖口分校預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法結果

| 模型     | 評估指標           | 50       |          | 100      |          | 200      |          | 400      |          | 800     |         |
|--------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|
|        |                | 專用電表     | 不分電表     | 專用電表     | 不分電表     | 專用電表     | 不分電表     | 專用電表     | 不分電表     | 專用電表    | 不分電表    |
| 線性迴歸   | MAE            | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.004   | 0.004   |
|        | MSE            | 0.00005  | 0.00004  | 0.00004  | 0.00004  | 0.00004  | 0.00004  | 0.00004  | 0.00004  | 0.00004 | 0.00004 |
|        | COR            | -0.010   | 0.185    | -0.013   | 0.136    | 0.065    | 0.162    | 0.068    | 0.212    | 0.101   | 0.117   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.497    | 0.339    | 0.665    | 0.414    | 0.539    | 0.677    | 0.722    | 0.510    | 0.643   | 0.474   |
| 支持向量機  | MAE            | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.006   | 0.005   |
|        | MSE            | 0.00006  | 0.00005  | 0.00005  | 0.00005  | 0.00006  | 0.00004  | 0.00005  | 0.00005  | 0.00006 | 0.00005 |
|        | COR            | -0.317   | -0.126   | -0.200   | 0.043    | -0.174   | 0.064    | -0.165   | 0.003    | -0.236  | -0.073  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.550    | 0.332    | 0.322    | 0.306    | 0.180    | 0.282    | 0.012    | 0.222    | 0.035   | 0.110   |
| 隨機森林   | MAE            | 0.005    | 0.004    | 0.005    | 0.005    | 0.005    | 0.004    | 0.005    | 0.005    | 0.004   | 0.004   |
|        | MSE            | 0.00006  | 0.00004  | 0.00005  | 0.00004  | 0.00005  | 0.00004  | 0.00005  | 0.00004  | 0.00004 | 0.00004 |
|        | COR            | -0.174   | 0.227    | -0.058   | 0.148    | -0.174   | 0.084    | -0.072   | 0.075    | 0.023   | 0.076   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.457    | 0.594    | 0.487    | 0.521    | 0.498    | 0.515    | 0.477    | 0.393    | 0.516   | 0.552   |
| 人工神經網路 | MAE            | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.002   | 0.002   |
|        | MSE            | 0.000006 | 0.000003 | 0.000005 | 0.000004 | 0.000009 | 0.000005 | 0.000007 | 0.000004 | 0.00001 | 0.00001 |
|        | COR            | 0.803    | 0.849    | 0.790    | 0.826    | 0.632    | 0.793    | 0.694    | 0.834    | 0.565   | 0.522   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.975    | 0.997    | 0.975    | 0.994    | 0.989    | 0.989    | 0.995    | 0.998    | 0.993   | 0.985   |

表5-22、橋頭國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果

| 模型     | 評估指標           | 50      |         | 100     |         | 200     |         | 400     |         | 800     |         |
|--------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        |                | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    |
| 線性迴歸   | MAE            | 0.006   | 0.005   | 0.006   | 0.006   | 0.005   | 0.006   | 0.005   | 0.006   | 0.005   | 0.006   |
|        | MSE            | 0.00006 | 0.00004 | 0.00005 | 0.00006 | 0.00004 | 0.00006 | 0.00004 | 0.00005 | 0.00004 | 0.00005 |
|        | COR            | -0.704  | -0.188  | -0.590  | -0.575  | -0.036  | -0.611  | -0.096  | -0.334  | -0.118  | -0.627  |
|        | R <sup>2</sup> | -0.394  | 0.382   | -0.515  | -0.712  | -0.397  | -0.357  | -0.104  | -0.245  | -0.163  | -0.139  |
| 支持向量機  | MAE            | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.006   | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   |
|        | MSE            | 0.00005 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00006 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 |
|        | COR            | -0.300  | -0.255  | -0.158  | -0.542  | -0.069  | -0.057  | -0.151  | -0.090  | -0.188  | -0.144  |
|        | R <sup>2</sup> | -0.186  | 0.320   | -0.408  | 0.368   | -0.296  | -0.242  | -0.522  | -0.399  | -0.660  | -0.508  |
| 隨機森林   | MAE            | 0.004   | 0.004   | 0.005   | 0.004   | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   |
|        | MSE            | 0.00003 | 0.00003 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 | 0.00004 |
|        | COR            | 0.035   | 0.044   | -0.058  | 0.018   | -0.046  | -0.030  | -0.106  | 0.007   | -0.116  | -0.031  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.390   | -0.458  | -0.423  | -0.508  | -0.550  | -0.561  | -0.697  | -0.703  | -0.823  | -0.702  |
| 人工神經網路 | MAE            | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   |
|        | MSE            | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 |
|        | COR            | 0.409   | 0.443   | 0.473   | 0.490   | 0.433   | 0.436   | 0.445   | 0.524   | 0.416   | 0.466   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.999   | 0.997   | 0.996   | 0.999   | 0.969   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.970   | 0.999   |

表5-23、大同國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果

| 模型    | 評估指標           | 50      |         | 100     |         | 200     |         | 400     |         | 800     |         |
|-------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       |                | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    |
| 線性迴歸  | MAE            | 0.003   | 0.004   | 0.003   | 0.004   | 0.003   | 0.004   | 0.004   | 0.005   | 0.004   | 0.003   |
|       | MSE            | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00003 | 0.00002 | 0.00003 | 0.00002 | 0.00003 | 0.00002 | 0.00002 |
|       | COR            | 0.106   | 0.047   | 0.258   | -0.336  | 0.242   | -0.092  | 0.054   | -0.593  | 0.015   | -0.065  |
|       | R <sup>2</sup> | 0.809   | 0.734   | 0.774   | 0.767   | 0.727   | 0.481   | 0.752   | 0.573   | 0.427   | 0.730   |
| 支持向量機 | MAE            | 0.003   | 0.003   | 0.004   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.004   | 0.004   | 0.004   | 0.004   |
|       | MSE            | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00002 |
|       | COR            | 0.181   | 0.243   | 0.065   | 0.134   | 0.070   | 0.103   | 0.041   | 0.060   | 0.042   | 0.038   |
|       | R <sup>2</sup> | 0.551   | 0.524   | 0.610   | 0.619   | 0.620   | 0.659   | 0.587   | 0.636   | 0.592   | 0.560   |
|       | MAE            | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.003   | 0.004   | 0.004   | 0.003   | 0.003   |



# 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

|        |                |          |          |          |          |          |          |         |          |          |          |
|--------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 隨機森林   | MSE            | 0.00002  | 0.00002  | 0.00002  | 0.00002  | 0.00002  | 0.00002  | 0.00002 | 0.00002  | 0.00002  | 0.00002  |
|        | COR            | 0.137    | 0.140    | 0.123    | 0.225    | 0.095    | 0.140    | 0.074   | 0.075    | 0.049    | 0.123    |
|        | R <sup>2</sup> | 0.493    | 0.571    | 0.701    | 0.710    | 0.617    | 0.627    | 0.790   | 0.565    | 0.564    | 0.678    |
| 人工神經網路 | MAE            | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001   | 0.001    | 0.001    | 0.001    |
|        | MSE            | 0.000009 | 0.000008 | 0.000008 | 0.000008 | 0.000007 | 0.000009 | 0.00001 | 0.000008 | 0.000008 | 0.000009 |
|        | COR            | 0.753    | 0.777    | 0.760    | 0.777    | 0.799    | 0.756    | 0.686   | 0.735    | 0.744    | 0.714    |
|        | R <sup>2</sup> | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999   | 0.999    | 0.996    | 0.999    |

表5-24、華龍國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果

| 模型     | 評估指標           | 50      |         | 100     |         | 200     |         | 400     |         | 800     |         |
|--------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        |                | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    | 專用電表    | 不分電表    |
| 線性迴歸   | MAE            | 0.005   | 0.007   | 0.006   | 0.006   | 0.005   | 0.007   | 0.007   | 0.006   | 0.007   | 0.005   |
|        | MSE            | 0.00006 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00006 | 0.00005 | 0.00008 | 0.0001  | 0.00007 | 0.0001  | 0.00005 |
|        | COR            | -0.484  | -0.851  | -0.702  | -0.612  | -0.254  | -0.654  | -1.691  | -0.598  | -1.368  | -0.292  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.997   | 0.913   | 0.918   | 0.797   | 0.715   | 0.095   | 0.995   | 0.350   | 0.985   | 0.962   |
| 支持向量機  | MAE            | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.007   | 0.005   | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   |
|        | MSE            | 0.00008 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00008 | 0.00005 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00006 | 0.00006 | 0.00006 |
|        | COR            | -0.831  | -0.738  | -0.734  | -0.864  | -0.387  | -0.658  | -0.667  | -0.410  | -0.521  | -0.472  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.921   | 0.797   | 0.979   | 0.761   | 0.993   | 0.853   | 0.994   | 0.955   | 0.987   | 0.982   |
| 隨機森林   | MAE            | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   | 0.006   |
|        | MSE            | 0.00007 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00006 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00007 | 0.00006 |
|        | COR            | -0.610  | -0.694  | -0.545  | -0.608  | -0.581  | -0.603  | -0.681  | -0.593  | -0.733  | -0.531  |
|        | R <sup>2</sup> | 0.970   | 0.854   | 0.928   | 0.977   | 0.994   | 0.971   | 0.925   | 0.899   | 0.879   | 0.920   |
| 人工神經網路 | MAE            | 0.002   | 0.002   | 0.001   | 0.002   | 0.001   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   | 0.002   |
|        | MSE            | 0.00002 | 0.00002 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00002 |
|        | COR            | 0.150   | 0.225   | 0.527   | 0.384   | 0.536   | 0.455   | 0.427   | 0.382   | 0.404   | 0.322   |
|        | R <sup>2</sup> | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   |

表5-25、溪湖國小預測模型採用專用電錶和不分電錶演算法之結果

| 模型     | 評估指標           | 50       |          | 100      |          | 200      |          | 400      |          | 800      |          |
|--------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|        |                | 專用電表     | 不分電表     | 專用電表     | 不分電表     | 專用電表     | 不分電表     | 專用電表     | 不分電表     | 專用電表     | 不分電表     |
| 線性迴歸   | MAE            | 0.006    | 0.004    | 0.005    | 0.004    | 0.005    | 0.004    | 0.005    | 0.004    | 0.004    | 0.004    |
|        | MSE            | 0.00005  | 0.00003  | 0.00004  | 0.00003  | 0.00005  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00004  | 0.00003  | 0.00003  |
|        | COR            | -0.160   | 0.309    | 0.114    | 0.326    | 0.051    | 0.203    | 0.179    | 0.141    | 0.207    | 0.243    |
|        | R <sup>2</sup> | 0.848    | 0.593    | 0.868    | 0.692    | 0.747    | 0.627    | 0.944    | 0.721    | 0.870    | 0.671    |
| 支持向量機  | MAE            | 0.004    | 0.004    | 0.003    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.003    | 0.004    | 0.004    | 0.004    |
|        | MSE            | 0.00002  | 0.00003  | 0.00002  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00002  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  |
|        | COR            | 0.475    | 0.373    | 0.496    | 0.341    | 0.348    | 0.389    | 0.466    | 0.419    | 0.348    | 0.386    |
|        | R <sup>2</sup> | 0.917    | 0.875    | 0.905    | 0.888    | 0.875    | 0.916    | 0.938    | 0.885    | 0.845    | 0.878    |
| 隨機森林   | MAE            | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.004    | 0.005    | 0.004    |
|        | MSE            | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  | 0.00003  |
|        | COR            | 0.376    | 0.267    | 0.291    | 0.362    | 0.235    | 0.379    | 0.227    | 0.284    | 0.242    | 0.289    |
|        | R <sup>2</sup> | 0.792    | 0.690    | 0.730    | 0.643    | 0.781    | 0.753    | 0.770    | 0.712    | 0.775    | 0.685    |
| 人工神經網路 | MAE            | 0.001    | 0.001    | 0.0007   | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.001    | 0.0009   | 0.002    |
|        | MSE            | 0.000003 | 0.000007 | 0.000001 | 0.000007 | 0.000003 | 0.000007 | 0.000005 | 0.000006 | 0.000002 | 0.000009 |
|        | COR            | 0.916    | 0.820    | 0.949    | 0.820    | 0.913    | 0.817    | 0.868    | 0.838    | 0.933    | 0.790    |
|        | R <sup>2</sup> | 0.999    | 0.992    | 0.999    | 0.996    | 0.997    | 0.999    | 0.999    | 0.978    | 0.999    | 0.992    |





## 第五章 結果與討論

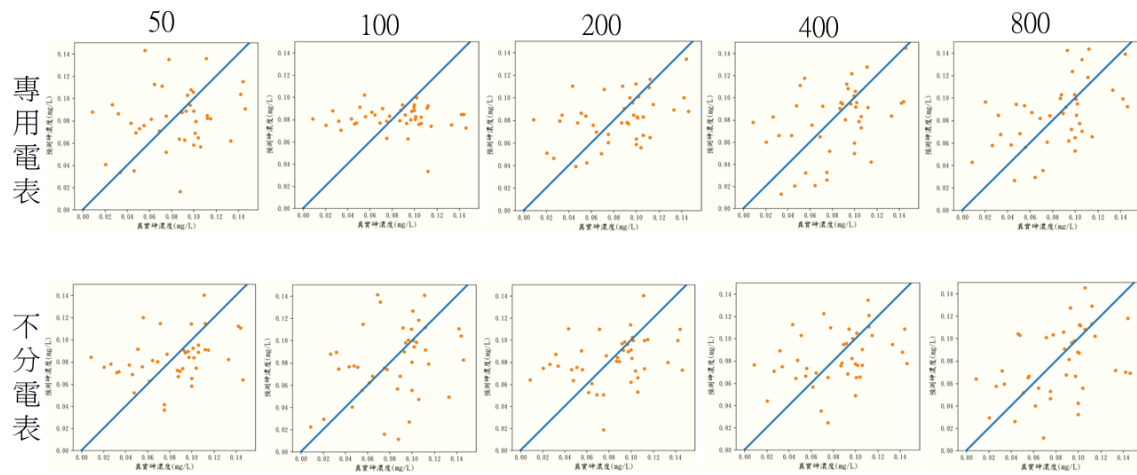


圖5-30、台西國小不同抽水井數量線性迴歸模型之結果

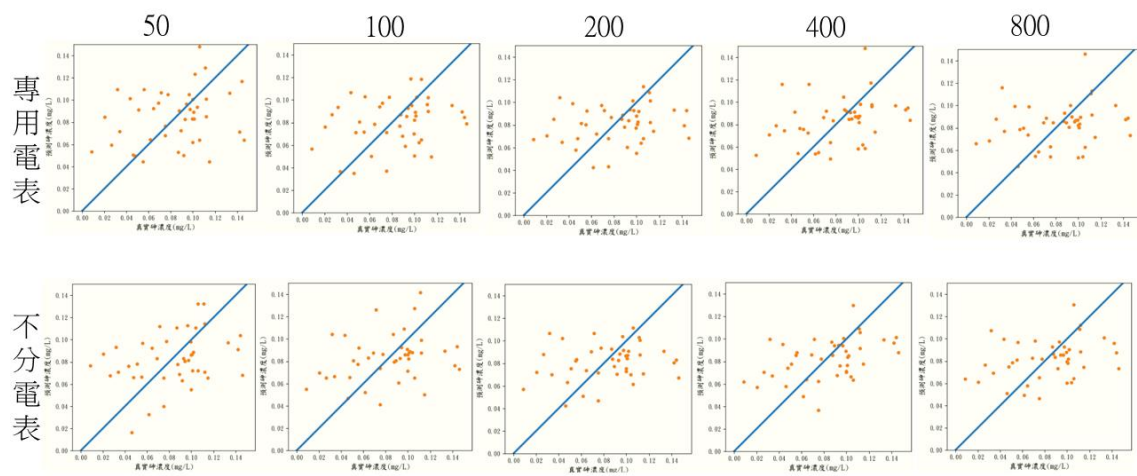


圖5-31、台西國小不同抽水井數量支持向量機模型之結果



## 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

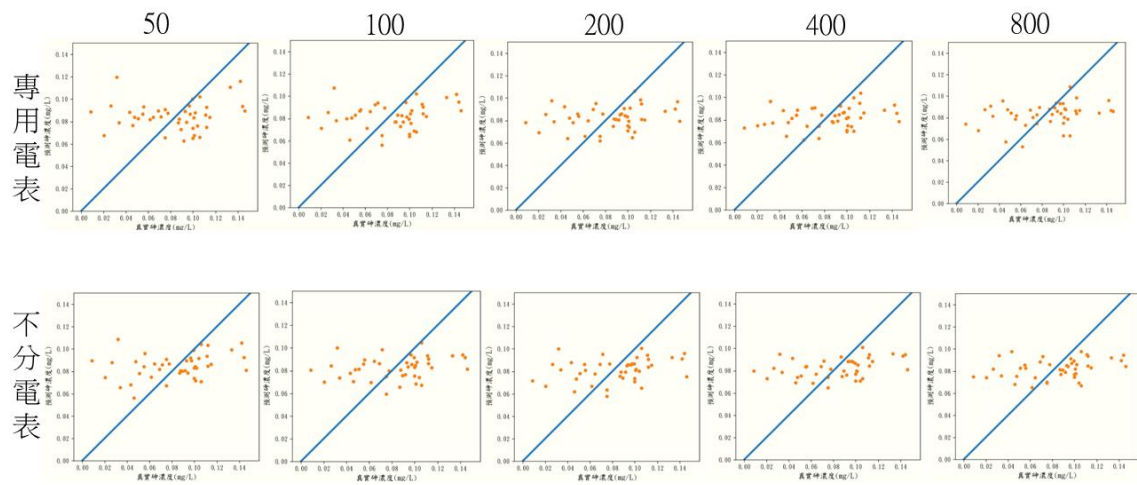


圖5-32、台西國小不同抽水井數量隨機森林模型之結果

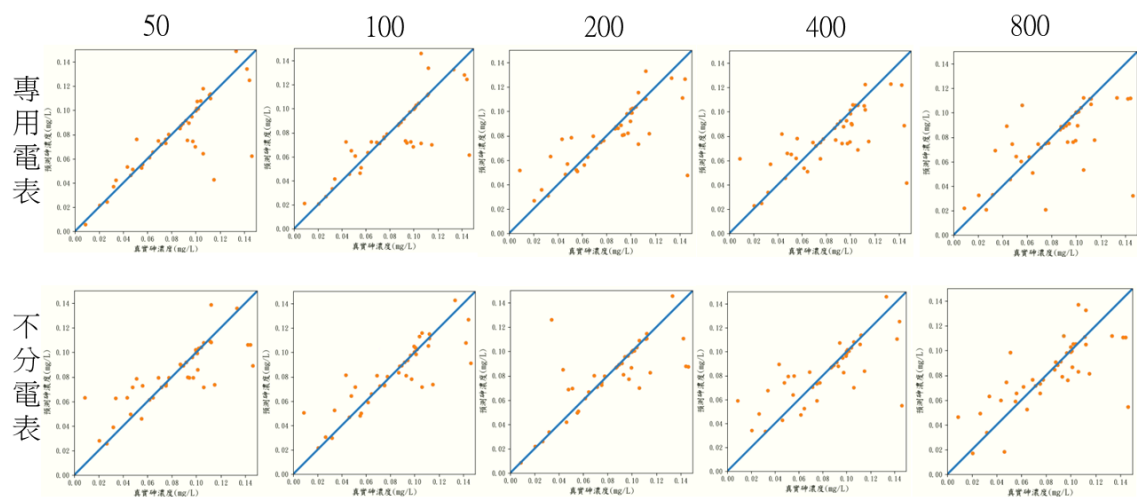


圖5-33、台西國小不同抽水井數量人工神經網路模型之結果



## 第五章 結果與討論

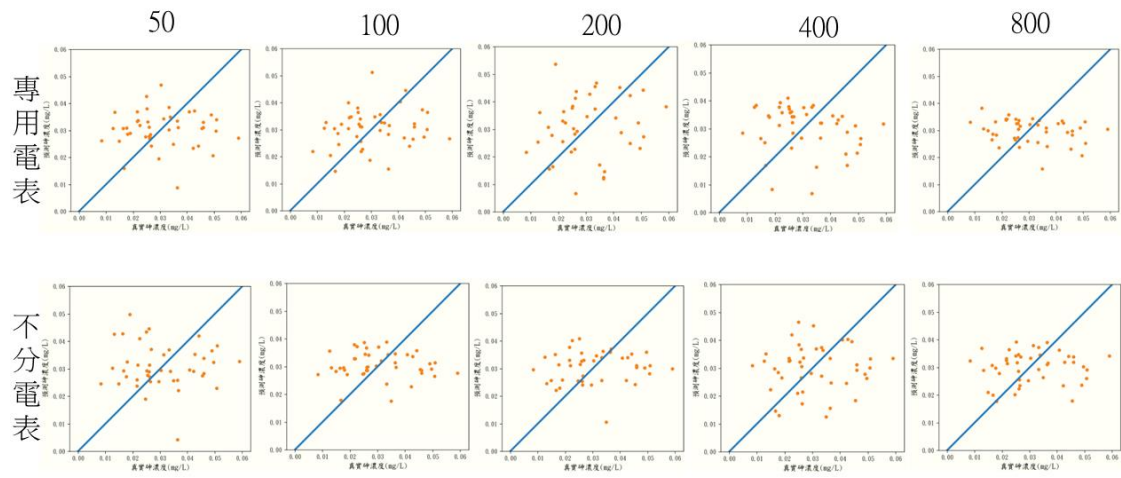


圖5-34、新寶國小不同抽水井數量線性迴歸模型之結果

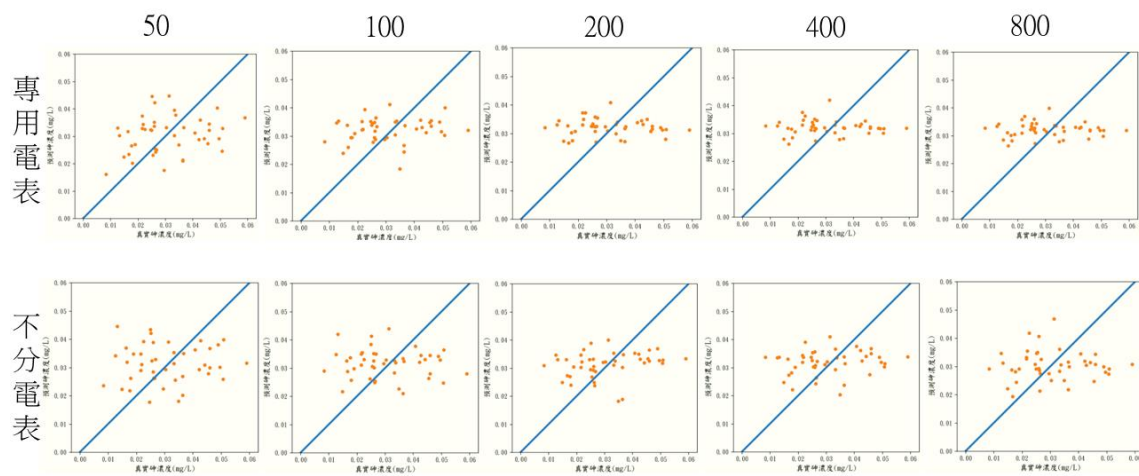


圖5-35、新寶國小不同抽水井數量支持向量機模型之結果



## 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

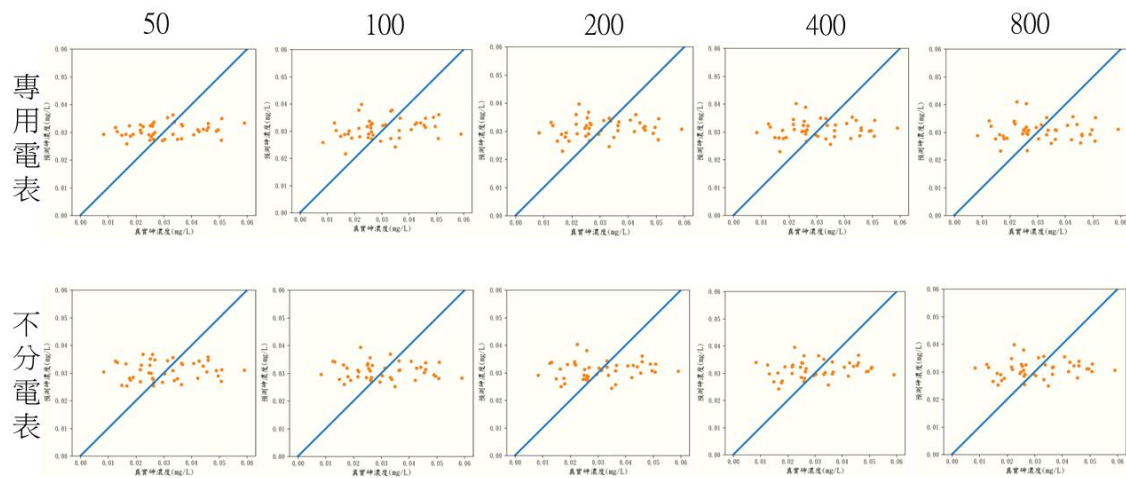


圖5-36、新寶國小不同抽水井數量隨機森林模型之結果

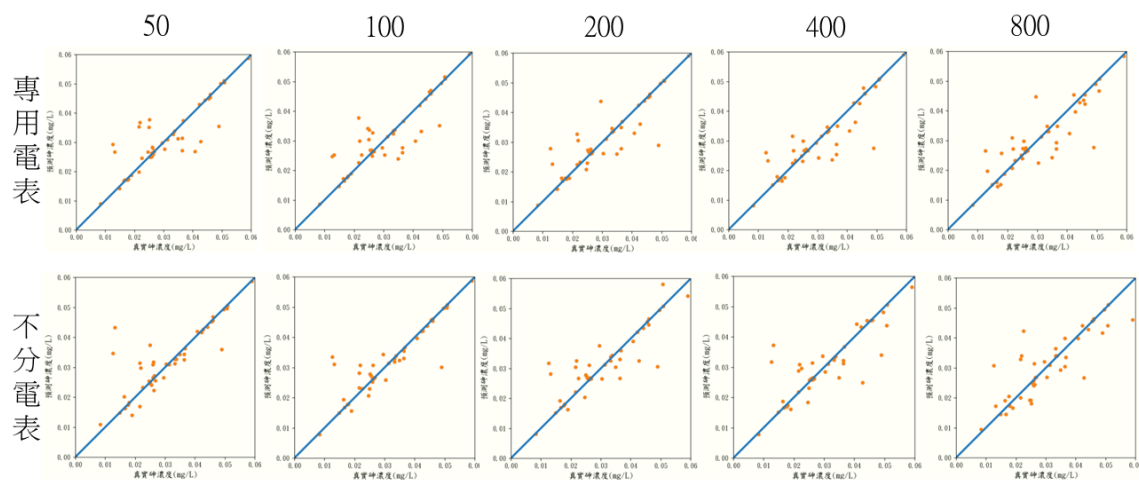


圖5-37、新寶國小不同抽水井數量人工神經網路模型之結果

### (三) 篩選目標監測井之重要特徵水井

本研究依據表5-15~表5-24之各口目標監測井中，選擇  $R^2$  值最高之周遭專用電錶及不分電錶後，再以隨機森林之特徵重要性 (Feature Importance) 方式計算每口抽水井之特徵值 (Score)，藉以篩選出影響該口監測井砷濃度之重要特徵水井名單，本計畫為利用隨機森林建構迴歸模



型，其貢獻評估方式為計算平均平方誤差(MSE)，在建構訓練模型時，可以計算每個特徵減少了樹中的平均平方誤差，再平均每個特徵的平均平方誤差，並據此對特徵進行排名。最終，算出來之所有特徵的值加總會等於1，而數值越大代表特徵的重要性越高，執行成果如圖5-38~圖5-46所示，圖中顏色越接近黃色表示重要性越高。

#### 四、小結

本計畫考量研究區域之目標監測井砷濃度資料筆數有限(最多僅46筆)，故雖以人工神經網路模型較佳，然而由於受限資料筆數過少可能導致模型有過度擬合情形，故篩選最適模型組別後，再以隨機森林建構迴歸模型搭配權重計算方式，找出影響監測井砷濃度之重要特徵水井，而重要特徵水井可提供做為未來優先調查名單。

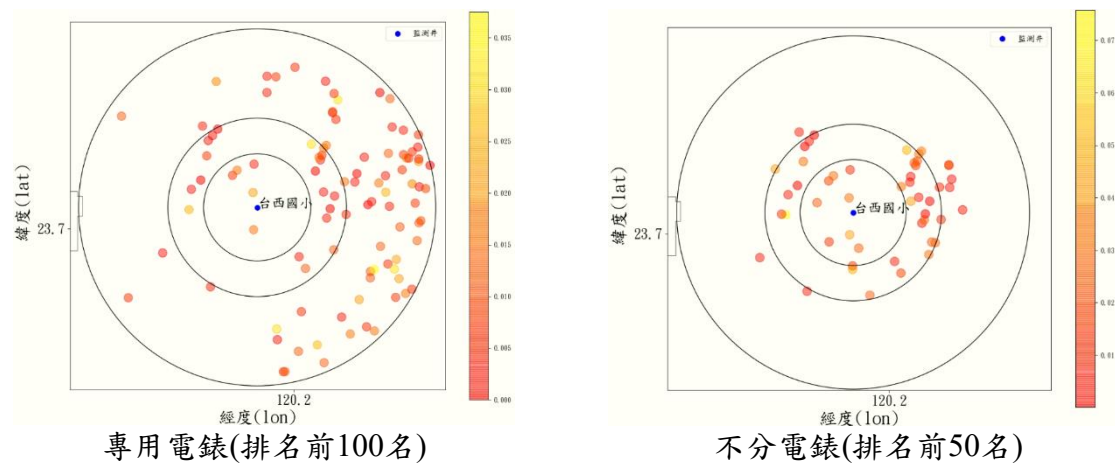


圖5-38、台西國小監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性

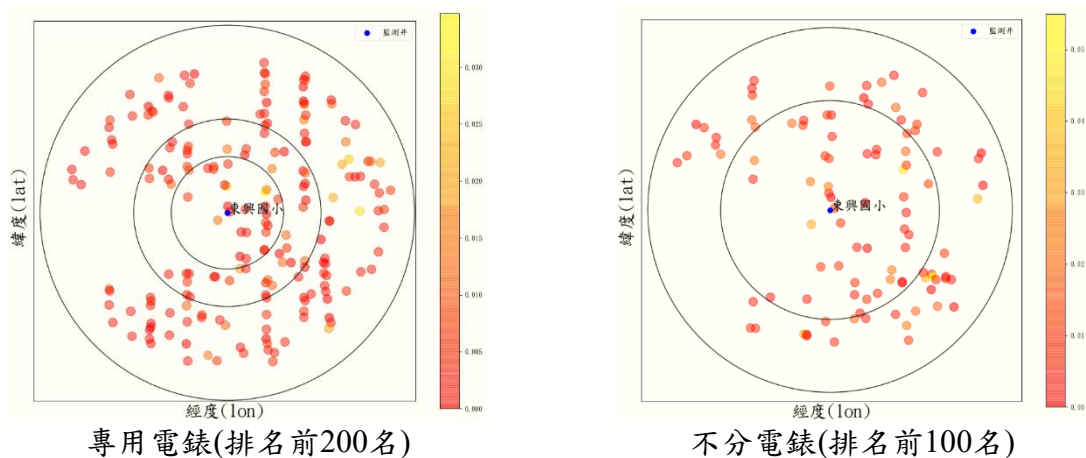


圖5-39、東興國小監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性





建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

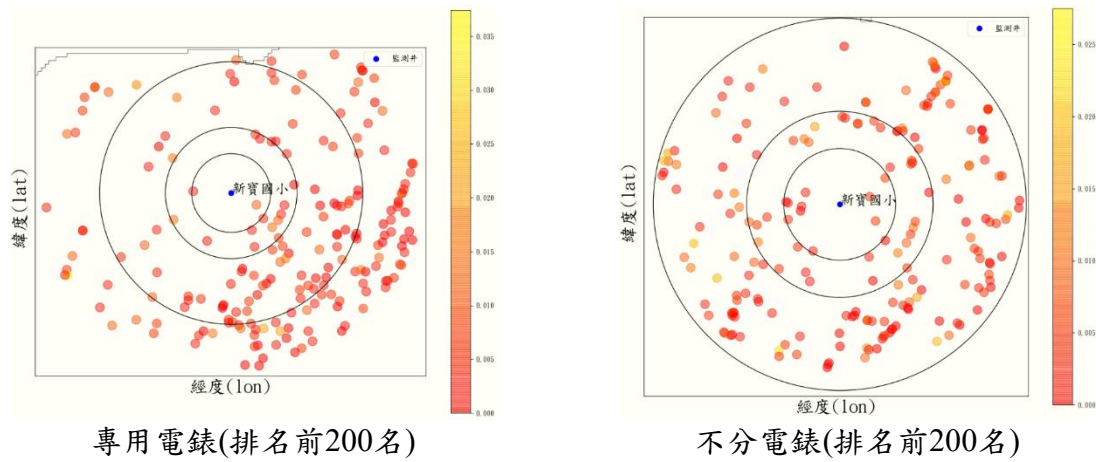


圖5-40、新寶國小監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性

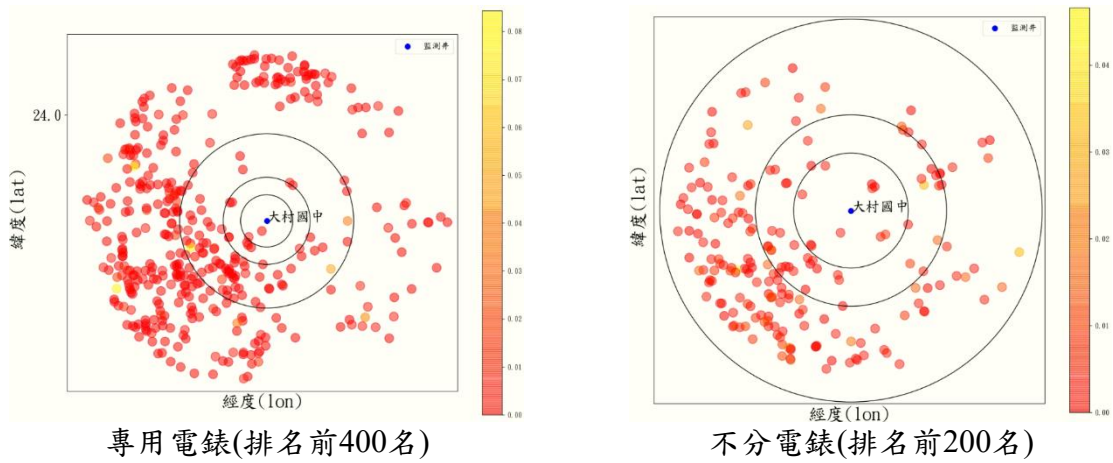


圖5-41、大村國中監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性

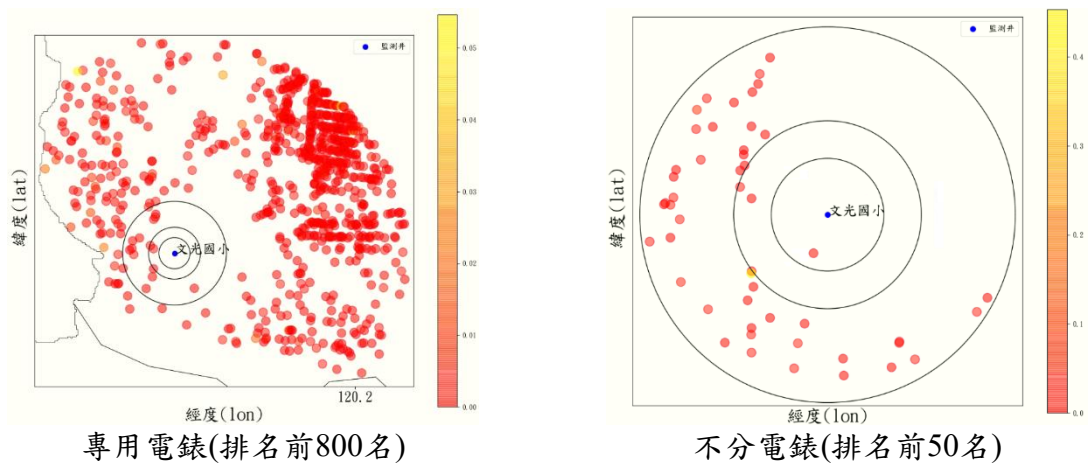


圖5-42、文光國小湖口分校監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性





第五章 結果與討論

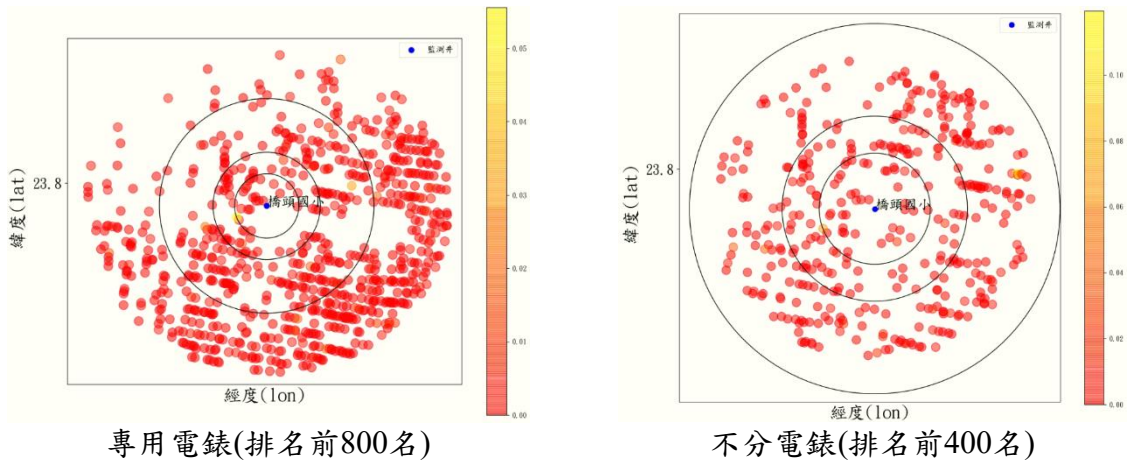


圖5-43、橋頭國小監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性

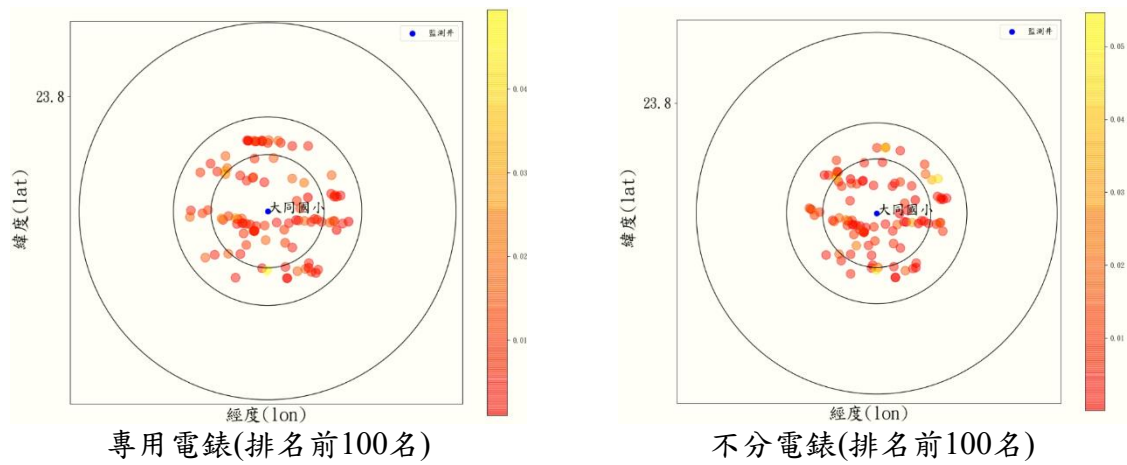


圖5-44、大同國小監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性

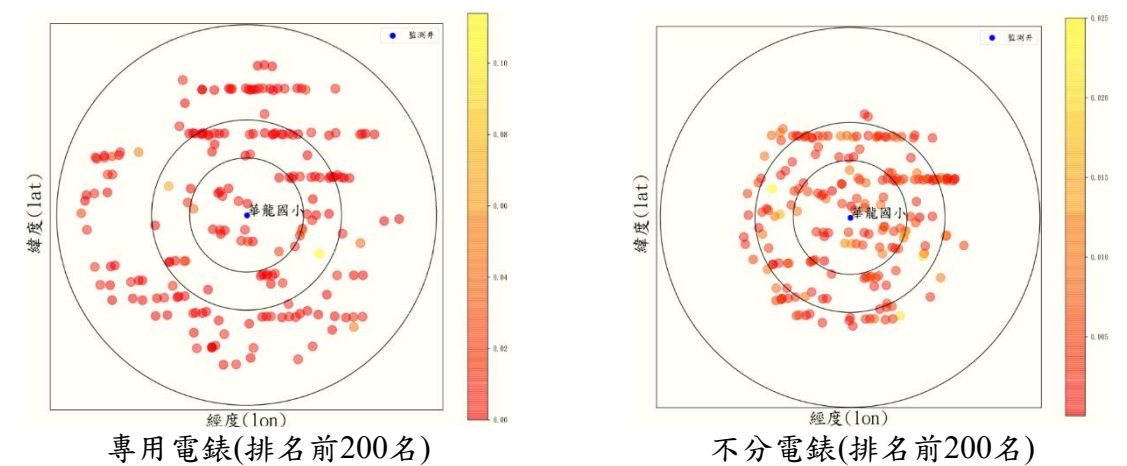


圖5-45、華龍國小監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性



## 建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案

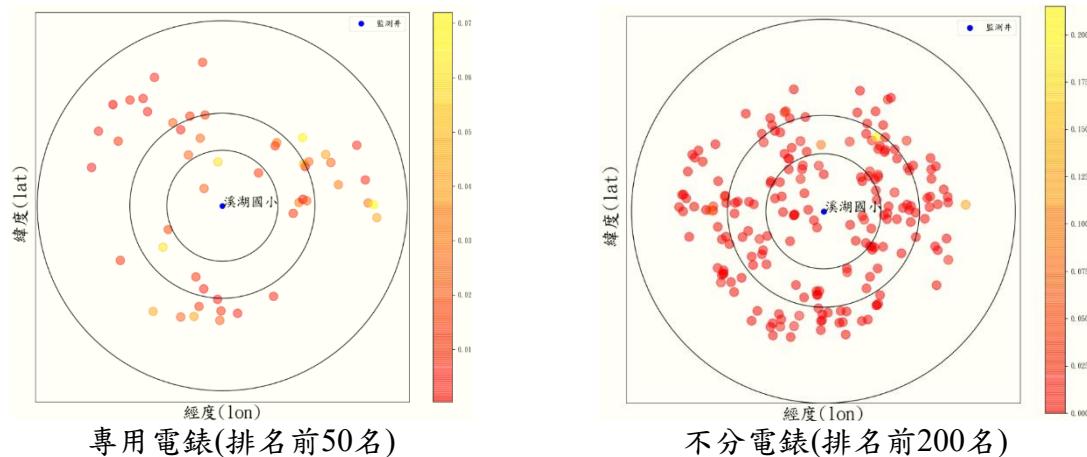


圖5-46、溪湖國小監測井砷濃度之重要特徵電表之地理分布及重要性

## 5.5 引灌富砷地下水之調適與因應方案

由相關文獻資料顯示地下水砷濃度與周遭抽水行為有關，故本計畫篩選監測井歷年砷濃度偏高之監測井，辦理動態因子分析及機器學習模型建立，顯示水井用電量與砷濃度變化亦有顯著相關，因此，本計畫蒐集富砷地下水區域現行管理政策，並進一步依據本計畫成果提出相關結論與建議，說明如下。

### 一、目前富砷地下水區域之管理政策

依據本計畫建立之地下水砷濃度變化預測模型，可設計不同的降雨機率、補注條件、及農業灌溉抽水量之情境，推估未來地下水砷濃度變化情形，因應國內部分地區農業生產環境尚存引灌自然富砷地下水之風險，為維護國內土壤及地下水品質，本計畫已初步彙集行政院環境保護署(2020)針對行政院環境保護署、經濟部水利署及行政院農業委員會等單位對於砷污染高潛勢區域之管理策略及預警配套措施，說明如下。

#### (一) 行政院環境保護署

1. 滾動式檢討土壤及地下水砷濃度潛勢範圍，經由定期研商會議與資料交流平台分享資訊。
2. 若農業用地可能遭受自然環境、人為活動之砷污染時，應長期監測土壤、灌溉水和食用作物，以預防和減少受砷污染之食用作物，並根據土污法第6條第1項辦理。
3. 配合農業單位辦理高風險農地聯合調查作業，於食用作物抽測同時採集土壤及引灌水源，提供後續污染查證使用。



## (二) 經濟部水利署

1. 除加強水資源調配研究工作，應將水質概念納入規劃處理標準，避免富砷或其他污染之虞水源在調配系統中循環。
2. 未來在水量管理研究許可之前提下，可增加區域含水層水質特性研究，定義建議優先汲取地下水之分層。
3. 透過水權登記制度審查設置位置、設置深度、抽水量等，提醒水權人注意自身用水安全，水利署已函文通知縣市水利主管機關，於地下水砷濃度潛勢範圍內如有水權申請或展延案件提出時，應予以登載警語週知。
4. 持續辦理轄下觀測井水質分析調查工作，並列為跨單位交流共享監測資源。

## (三) 行政院農業委員會

1. 透過灌溉水源適度調配將仰賴抽汲地下水源區域轉用地表水，可避免富砷水源大量進入農地栽培區域影響作物生產安全。
2. 持續檢討公用地下水井存在需要，並優先規劃砷污染潛勢區及地下水管制範圍內之水井填塞。
3. 於地表水相對不充裕地區，輔導農民由稻作轉為旱作，並列為優先農藝管理推廣示範地區，拓展農地使用價值。
4. 持續辦理長期引灌富砷地下水農地周遭灌溉水質調查，以保障潛勢範圍內農地灌溉用水權益。
5. 農糧署針對農糧作物辦理農作物農藥殘留及重金屬污染監測作業，並建立監測結果不合格案件之處理機制與輔導措施，且於民國108年起通知環保單位進行聯合採樣作業。

## 二、本計畫之結論與建議

### (一) 結論

1. 考量水井資料來源不可考及用水型態不同，且空間位置不同存在很大的差異性，故本計畫直接以電量資料當作模型之特徵值，執行動態因子分析、機器學習模型之建置等工作。
2. 經由歷史資料統計分析結果，顯示在豐水期(第二、三季)之地下水砷濃度較低，與周遭抽水井之用電量較大有明顯正相關，



並歸納抽水距離與水力傳導係數呈現顯著正相關、而與井深呈現顯著負相關。

3. 由於抽水行為是造成砷濃度變化之重要因子，故本計畫利用動態因子分析依序找出造成目標監測井砷濃度變化之最佳影響水井數量及其水井最遠距離。
4. 本計畫以目標監測井周圍最近數十口至數百口分別考量專用電錶及不分電錶單獨建置機器學習預測模型，結果以人工神經網路模型較佳，然而由於受限資料筆數過少可能導致模型有過度擬合情形，故以再以隨機森林建構迴歸模型搭配權重計算方式，找出影響監測井砷濃度之重要特徵水井。

## (二) 建議

1. 建議行政院環境保護署以逐月採樣檢測方式，累積監測井之砷濃度檢測數據並釐清砷濃度變化趨勢。
2. 建議行政院環境保護署針對重要特徵水井進行水質抽測工作，釐清特徵水井砷濃度是否與監測井砷濃度具有相關。
3. 建議行政院農業委員會針對動態因子分析鄰近監測井名單及機器學習預測重要特徵監測井名單，進一步釐清作物類型及用水情形，並將水井所在農地優先列為推動輔導作物轉作。
4. 建議行政院農業委員會以逐月採樣檢測方式，累積灌溉水體之砷濃度檢測數據，確保灌溉水質皆符合標準，避免引灌到富砷之地下水。



## 參考文獻

1. Akaike, H., Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. 2nd International Symposium on Information Theory, pp. 267-281 (1973).
2. Bozdogan, H., Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*, Vol. 52, pp.345-370 (1987).
3. Burrough, P.A., and McDonnell, R.A., Principles of geographical information systems. Oxford university press, New York (1998).
4. Chakraborty, M., Sarkar, S., Mukherjee, A., Shamsudduha, M., Ahmed, K.M., Bhattacharya, A., Mitra, A., Modeling regional-scale groundwater arsenic hazard in the transboundary Ganges River Delta, India and Bangladesh: Infusing physically-based model with machine learning, *Science of The Total Environment*, Vol. 748, 141107 (2020).
5. Frederick, L., VanDerslice, J., Taddie, M., Malecki, K., Gregg, J., Faust, N., Johnson, W.P., Contrasting regional and national mechanisms for predicting elevated arsenic in private wells across the United States using classification and regression trees, *Water Research*, Vol. 91, pp.295-304 (2016).
6. Guo, H., Wen, D., Liu, Z., Jia, Y., Guo, Q., A review of high arsenic groundwater in Mainland and Taiwan, China: Distribution, characteristics and geochemical processes, *Applied Geochemistry*, Vol. 41, pp.196-217 (2014).
7. Knappett, P.S.K., Mailloux, B.J., Choudhury, I., Khan, M.R., Michael, H.A., Barua, S., Mondal, D.R., Steckler, M.S., Akhter, S.H., Ahmed, K.M., Bostick, B., Harvey, C.F., Shamsudduha, M., Shuai, P., Mihajlov, I., Mozumder, R., van Gree, A., Vulnerability of low-arsenic aquifers to municipal pumping in Bangladesh, *Journal of Hydrology*, Vol. 539, pp.674-686 (2016).
8. Liu, C.W., Wang, S.W., Jang, C.S., Lin, K.H., Occurrence of arsenic in ground water in the Choushui River alluvial fan, Taiwan, *Journal of Environmental Quality*, Vol. 35, pp.68-75 (2006).





9. Lu, K.L., Liu, C.W., Wang, S.W., Jang, C.S., Lin, K.H., Liao, H.C., Liao, C.M., Chang, F.J., Assessing the characteristics of groundwater quality of arsenic contaminated aquifers in the blackfoot disease endemic area, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 185, pp.1458-1466 (2011).
10. Lu, K.L., Liu, C.W., Wang, S.W., Jang, C.S., Lin, K.H., Liao, H.C., Liao, C.M., Chang, F.J., Primary sink and source of geogenic arsenic in sedimentary aquifers in the southern Choushui River alluvial fan, Taiwan, *Applied Geochemistry*, Vol. 25, pp.684-695 (2010).
11. Mukherjee, A., Fryar, A.E., Scanlon, B.R., Bhattacharya, P., Bhattacharya, A., Elevated arsenic in deeper groundwater of the western Bengal basin, India: extent and controls from regional to local scale, *Applied Geochemistry*, Vol. 26, pp.600-613 (2011).
12. Nath, B., Sahu, S.J., Jana, J., Mukherjee-Goswami, A., Roy, S., Sarkar, M.J., Chatterjee, D., Hydrochemistry of arsenic-enriched aquifer from rural West Bengal, India: A study of the arsenic exposure and mitigation option, *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 190, pp.95-113 (2007).
13. Ravenscroft, P., Burgess, W.G., Ahmed, K.M., Burren, M., Perrin, J., Arsenic in groundwater of the Bengal Basin, Bangladesh: distribution, field relations and hydrogeological setting, *Hydrogeology Journal*, Vol. 13, pp.727-751 (2005).
14. Rodríguez, R., Ramos, J.A., Armienta, A., Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall, *Applied Geochemistry*, Vol. 19, pp.245-250 (2004).
15. Schaefer, M.V., Guo, X., Gan, Y., Benner, S.G., Griffin, A.M., Gorski, C.A., Fendorf, S., Redox controls on arsenic enrichment and release from aquifer sediments in central Yangtze River Basin, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 204, pp.104-119 (2017).
16. Schaefer, M.V., Ying, S.C., Benner, S.G., Duan, Y., Wang, Y., Fendorf, S., Aquifer arsenic cycling induced by seasonal hydrologic changes within the Yangtze River Basin. *Environmental Science & Technology*, Vol. 50, pp.3521-3529 (2016).
17. Shapiro, S.S., and Wilk, M.B., An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, Vol. 52, pp.591-611 (1965).





18. Shamsudduha, M., Taylor, R.G., Chandler, R.E., A generalised regression model of arsenic variations in the shallow groundwater of Bangladesh, *Water Resources Research*, Vol. 51, pp.685-703 (2015).
19. Wang, S.W., Kuo, Y.M., Kao, Y.H., Jang, C.S., Maji, S.K., Chang, F.J., Liu, C.W., Influence of hydrogeochemical variables on the As variation in shallow groundwater of southwestern Taiwan, *Journal of Hydrology*, Vol. 408, pp.286-295 (2011).
20. Wang, S.W., Liu, C.W., Lu, K.L., Lin, L.H., Biogeochemical cycling of ferric oxyhydroxide affecting As partition in groundwater aquitard, *Environmental Geochemistry and Health*, Vol. 34, pp.467-479 (2012).
21. Xiao, C., Ma, T., Du, Y., Arsenic releasing mechanisms during clayey sediments compaction: An experiment study, *Journal of Hydrology*, 125743 (2020).
22. Zhang, Z., Guo, H., Liu, S., Weng, H., Han, S., Gao, Z., Mechanisms of groundwater arsenic variations induced by extraction in the western Hetao Basin, Inner Mongolia, China, *Journal of Hydrology*, Vol. 583, 124599 (2020).
23. 行政院農業委員會，2013，102年度彰雲地區灌溉用水效率規劃與調配檢討計畫，淡江大學。
24. 行政院環境保護署，2014，地下水有害物質環境傳輸調查及管制標準檢討計畫(第二期)，業興環境科技股份有限公司。
25. 行政院環境保護署，2016，自然背景富砷地下水影響之農地土壤調查及整治技術評估計畫，業興環境科技股份有限公司。
26. 行政院環境保護署，2018，自然背景富砷地下水影響之農地土壤及地下水砷移除技術試驗與發展計畫，業興環境科技股份有限公司。
27. 行政院環境保護署，2019，全國地下水水質巨量分析與管理推動計畫，業興環境科技股份有限公司。
28. 張斐章、張麗秋，類神經網路導論：原理與應用，蒼海書局，2010。
29. 經濟部水利署，2017，106年度地層下陷防治專案服務計畫，國立成功大學。



**建構富砷地下水濃度變化預測模型與用水安全調適方案**

30. 經濟部水利署，2018，民國107年水利年報。
31. 經濟部水利署，2019，108年度水井管理實務推動計畫，亞磊數研工程顧問有限公司。
32. 經濟部水利署中區水資源局，2007，濁水溪沖積扇地面地下水聯合運用管理模式建立與機制評估，中興工程顧問股份有限公司。