

行政院環境保護署

106 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

土壤地下水地圖網頁線上資料分析及 互動式模擬平台開發

期末報告(定稿)

主辦單位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立中央大學／應用地質研究所
專案主持人：倪春發教授
專案執行期間：106 年 01 月 09 日起至
106 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 106 年 11 月 印製

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
106 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

專案類型 ☒ 研究專案 ☐ 模場試驗			
專案主持人	倪春發	專案主題	☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 預防 ☐ 自訂
專案名稱	土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發		
委員	審查意見	回覆說明	
委員一	1. 本專案預估之成果績效似不易評估。 (1) 前一年度的成果是否需持續研究，本計畫如果延續前一年度的計畫，則該計畫應用時(或驗證時)的應用限制條件是否有必要繼續討論?本年度是延續或是…? (2) 前一年度研究成果精確度與準確度的評估參數與依據是否完整? (3) 開發新的展示平台: 時機上是否適當(本平台(或技術)是否已成熟(含驗證)? 穩定? 可信度? 是否與既有系統整合? 或是一完全新的平台? 與既有系統的競合?)。 (4) 所需的傳輸模式是重新建構開發? 或是利用商業軟體? 或是…? (5) 與既有的商業化軟體比較的異同? (6) 與國內其他系統的競合(含土污基金)? (7) 本平台能提供何種服務?(計畫書中未明確說明) 未來的維護? 2. 研究方法可行，對未來的應用性的說明似不具體。 3. 預期成果評估原則與評估條件的說明似不具體。 4. 專案經費編列較高(如人事費與耗材費編列)。	1. 感謝委員建議，以下逐點回覆：(1)本年度所申請之專案計畫係為延續前一年度成果之延續研究，包括資料庫建立、平台介面建構、數值計算模組封包植入等，而針對本計畫所開拓之平台其限制條件已由去年度之期末報告提出，包含針對資料庫圖層之正確性、數值計算條件之限制、以及針對既有場址調查結果之交叉驗證等，本年度之計畫乃針對現有平台進行介面以及計算效率之優化，延續去年研究成果架構下開拓新分析功能及使用者應用。(2)前年度研究成果之精準度與準確度乃根據提用資料庫圖層來源資料之正確性。去年開發之計算模組分析成果是以既有調查結果(政府開放資料)驗證比對本平台所展示之分佈趨勢，因目前政府開放資料僅有關測數據之時空分布，未來若參數資料空間分布可取得，將再進行驗證比對。(3)本平台之研究目的係為整合現有各單位之圖層資訊(既有資訊)，輔以線上模擬分析(新創技術)，有別於現有的資料展示平台。本平台所使用之技術已廣泛應用於學術研究以及資訊工程開發上，各開發工具，包含模式等已被應用於相當多之學術研究上；本平台目前階段尚以獨立建構為主，未有與既有系統整合，僅以各系統匯出資料作為測試。(4)傳輸模式為國際上已開發驗證之地下水開放程式，本研究將轉建於線上資訊平台。(5)既有之商業軟體普遍以單機版本(使用於個人電腦)為主，而本平台開發則為跨政府開放資料之相關圖層資料整合(包含土污基金會之資訊平台)，再輔以數值模式模擬，並開放權限於使用者在網路上快速得到評估結果。目前平台僅以各政府單位資料庫匯出資訊做為測試，未來在政府資料分享規範下，將嘗試以直接連結方式擷取資料，作為平台資料庫資料來源。(6)本平台之發展可與其他系統並行，非做為競合目地，因本平台僅取用各資料庫系統資料，再配合本計畫開發之線上模式分析，當政府各資料庫資料更新，本開發平台資料庫系統亦隨之更新。目前之工作先以離線	

		方式，取得各單位資料庫匯出資料，建立介面優化、數值模式精算、物理機制驗證等方面為主。(7)本平台能提供服務之說明已撰寫於「3.3 執行工作項目」以及「5.2 執行成果方面之貢獻及成果效益」。請參閱。 2. 感謝委員建議；未來應用性為利用本平台線上空間資料分析與模擬平台可讓既有資料庫系統中點線面資訊做最大化應用，並提供土壤地下水相關領域人員針對特定資料、特定資料屬性進行空間分析與插值，協助土壤地下水調查、整治與管理；此外，透過地下水流與污染傳輸的物理模式接，分析平台還可提工作為預測，結合既有資料庫與管理策略研擬。 3. 感謝委員建議；預期成果評估與說明係根據上年度之工作成果以及目前研究進度所撰寫，細部說明將以未來實際工作成果再行闡述。 4. 感謝委員建議；本計劃編列計費為以計畫工作內容使用人力及所需耗材進行編列，將以實際核案金額從新編列。
委員二	1. 計畫主持人去年曾執行本補助計畫，主要研究專長為地下水模式開發與應用，研究專長與提出之計畫符合；過去五年內研究表現尚佳。 2. 本計畫以開發網路平台為主，具有地下水模式教育功能，是一項重要資訊整合工作，惟較無法看出學術創新部分。 3. 本研究擬開發網路版分析平台，以互動式、即時分析觀測資料與污染團分布，具有相當大的目標。這項工作相當重要，對於開放資料趨勢而言，可以提供一個很好的教育功能。 4. 地下水傳輸及污染團研判相當專業，也非常場址專一，建議計畫研究中，應說明如何提升模擬能力及結果解釋，以及平台之限制。另建議後續計畫成果應說明使用人數及推廣情形。	1. 感謝委員認可。 2. 感謝委員認可，本計畫所提出之工作動機與內容，係為建立於既有之學術成果配合先進的網路資訊科技，其目的為整合既有圖資與建構線上數值模擬機制，突破現有圖資平台僅能展示資訊之功能，提供產官學研界針對現有土壤地下水污染相關工作之使用工具提升。 3. 感謝委員認可。 4. 感謝委員建議，將參考委員之意見開拓本平台之成果。
委員三	專任助理是否編列經費。	本研究預計編列一位博士後研究，協助本計畫研究時程規劃與計畫成果撰寫。

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
106 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

委員四	1. 傳統網頁部分:建議本計畫與現有環保署土基會網頁進行整合,避免過多平台,造成資訊混亂。 2. 行動裝置部分:建議可考慮與現有環保署空污資訊「環境即時通(2.0)」進行整合改版,方便民眾使用此手機應用程式,即可同時查詢空污及土水資訊。	1. 感謝委員建議,本平台可獨立運作,亦或可與現有平台進行即時介接,達成雙軌運作以及共有操縱之功能。 2. 感謝委員建議,本平台之行動裝置部分將參考現有相關之行動裝置資訊機能,以求建構符合官研、工程、以及民眾使用便利之機制。因平台的重要功能為即時模擬分析,和既有的資料展示平台不同,對用戶端的資源優化還需進一步測試。
-----	--	--

106 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申請書

一、專案基本資料表

申請編號：13

專案性質	☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質		專案類別(單選)	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題	☒ 整治 ☐ 預防 ☐ 其他				
申請機構系所	國立中央大學應用地質研究所				
機構地址	桃園市中壢區中大路 300 號				
專案主持人	倪春發		職等/職稱	教授	
協同主持人	李奕賢		職等/職稱	助理研究員	
專案名稱	中文	土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發			
	英文	Development of interactive map platform for soil and groundwater data analysis and transport modeling			
	關鍵字	地下水流、污染傳輸、互動地圖平台、開放資料、模擬、空間資料分析			
執行期程	自 民國 1 0 6 年 0 1 月 0 9 日 起 至 民國 1 0 6 年 1 1 月 3 0 日 止				
專案主持人	姓名：倪春發		E-mail：nichuenfa@geo.ncu.edu.tw	專線：03-4227151 # 65874 手機：0989483898	
專任助理	姓名：林淇平		E-mail：chepinglin@gmail.com	專線：03-4227151 # 65851 手機：0937150285	
經費分析總表	專 案 預 估 總 經 費 金 額			編列說明	
	1.	人事費用	494,000	(1~5 項相加之 50%為限)	
	2.	貴重儀器使用含維護費	0	(與計畫實驗相關)	
	3.	消耗性器材與主要費用	560,155	(與計畫主體相關)	
	4.	其它研究相關費用	0	(差旅與租賃費用)	
	5.	雜項費用	45,845	(1~6 項相加之 5%為限)	
	6.	行政管理費	0	(1~5 項相加之 10%為限)	
	專案計畫申請總金額		1,100,000		

說明：

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

專案主持人： 倪春發 (簽名及蓋章) 日期： 106.01.16

(請蓋上申請單位大小章)

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	106 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 整治 ☐ 預防 ☐ 其他	主持人：倪春發 NO：13	
計畫名稱	土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 執行現況、流程及方法已具體說明。 2. 計畫後續執行工作項目已於5.9節中說明。 3. 本計畫的執行進度並無落後。 4. 進度符合，依結案標準本計畫應可達成原計畫標的。 5. 研究內容與計畫目的相符。 6. 本計畫為執行中的計畫，目前已有初步的成果，執行成果的討論與建議的合理性尚待期末報告中進一步說明。 7. 整體研究成果符合預期。 8. 學術產出及活動、人才培育等符合預期(依據以往的成果研析)。 9. 本計畫仍在執行中，研究成果獲得專利、技術轉移等尚待期末報告中提出。 10. 本計畫的預期成果對社會經濟發展(土壤與地下水污染的產業)的效益，建議於期末報告中提出。 11. 5.4節 (P. 39) “… 可以應用於判斷歷史污染物濃度分布情形…”，建議更具體說明。 12. P. 42 “…做為定水頭邊界條件…” ，建議更具體說明，尤其是適合的條件為何？ 13. 本計畫提出許多模擬的情境與預期的結果，建議進一步討論合理性的判讀與適用條件的說明。 委員二：		回覆委員一： 1. 感謝委員意見，本計畫會持續掌握研究進度。 2. 目前以與土基會內組長與相關合作團隊接洽，預期合併本研究成果，持續整合型研究成果彙整。 3. 本研究將持續優化研究平台，增加合適水文地質、環境圖資以及地下水長期觀測資料庫，使本研究成果合理性增加。 4. 本研究近期將會整研究成果，投稿國際期刊(SCI)。 5. 關於專利申請部份，本團隊目前正在彙整關鍵技術，並搜尋既有國內外專利，以利申請專利流程。 6. 目前本團對正與國內外研究團隊與顧問公司接洽，希望能夠將研究成果立即運用於實場。 7. 關於委員第 11 點意見，增加修正於 5.4 節。“透過空間插值模組，可以應用於計算水力傳導係數、地表高層、初始水位分佈與污染物濃度分佈等資訊。故此模組則可以應用於針對每口監測井歷時濃度監測，分析當時污染物分佈，進而判斷不同污染物濃度分佈情形、地下水流向，並應用於推估未來設定地下水模式使用”。 8. 關於委員第 12 點意見，增加修正於 5.6 節。詳述每個定水頭設定條件。由於目前平台為開發測試階段，目前僅完成定水頭與不透水邊界條件，未來將會增加抽注井、河流、蒸發散等設定。 9. 關於委員第 13 點意見，本團隊將持續開發研究平台，並且應用更合理水文資訊，期許開發平台能夠獲得與現地相符合模擬成果。本團隊會依據委員意見，於期末報告中增加此意見。 回覆委員二： 1. 感謝委員意見，本團隊會持續掌握研究進度。 2. 已修正。	

1. 實際進度符合預定進度， 審查意見回覆未附冊。 2. 附件成果績效自評表，填表執行期程，請修正。 3. 期中完成之學術產出成果請列出。 4. 平台開發完成後，建議可以開放環保單位試用。 5. 期末報告建議將論文期刊文件附冊。 委員三： 1. 本計畫是否可與環保署土基會網頁進行整合?是否可與現有環保署資訊如「環境即時通(2.0)」進行整合改版，以利手機應用程式，即可同時查詢空污及土水資訊? 2. 請補充計畫進度甘特圖。 委員四： 1. 本計畫已初步開發網路平台，收集環保署SGM、水利署地理資訊倉儲中心、內政部地質調查所水文地質資料庫、及其他資料庫等資料，並進行介面與圖形化設計及介面架接、初步質點數值模擬，符合計畫進度。 2. 後續除持續加入MODFLOW模式外，建議亦能以汙染場址實際數據，進行案例模擬與展示，確認其應用性。 3. 本計畫除發表論文外，建議能關注如何確認其模擬正確性、以及推廣所開發平台之方式。	3. 本研究目前學術產出成果如下： a. 國內研討會：水利工程研討會投稿 3 篇。 b. 國際研討會：AOGS 投稿 2 篇。 c. 報告：期中報告 1 篇。 d. 已開發技術：本研究目前完成整合資料庫、數值方法與網頁技術。 e. 技術平台：開發地下水線上分析平台。 4. 感謝委員建議，如有機會願意讓多方嘗試本研究開發成果。 5. 將會於期末報告中，檢附本研究投稿成果。 回覆委員三： 1. 感謝委員建議，目前正與會內行政人員與相關廠商接洽，希望能夠完成初步整合會內既有資料庫。如果未來有相關研發基金，本研究願意協助整合既有空污網頁，彙整於相同網頁平台。 2. 目前於期中報告 P22 頁中已有呈現。 回覆委員四： 1. 感謝委員支持本計畫，協助統整會內 SGM 資料與我方收集資料庫，期許能擴展將目前資料庫，並使資源使用最大化。 2. 目前已開始著手收集相關汙染場址實際數據，未來可以運用數值模式模擬溶質歷史傳輸軌跡，以及未來影響區域。 4. 感謝委員對於本研究的建議，計算結果正確性對於模式開發確實為關鍵因素。目前已與會內合作，期許能獲得更多實場汙染觀測數據，以及現地水文資料，本研究將朝向提昇模式計算成果合理性為目標。
本署審查意見	計畫單位回覆
無	

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
106 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

期末報告審查意見表

專案主持人	倪春發 教授	NO : 13
服務單位	國立中央大學	
專案名稱	土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發	
委員一： 1. 專案研究計畫執行現況、流程及方法已具體說明。 2. 計畫後續執行工作項目及內容已於 p. 64 說明 3. 計畫執行進度與預定進度符合。 4. 執行進度並未落後。 5. 結案標準與原計畫相符。 6. 研究內容與原計畫目的相符。 7. 根據研究內容所提出之討論與建議合理，整體研究成果符合預期。 8. 學術產出及活動、人才培育等是符合預期。 9. 成果研發獲得專利、技術轉移：未說明。 10. 本計畫的研究成果具應用潛力，但 5.9 & 5.10 的說明不易理解。	回覆說明： 1-8. 感謝委員肯定。 9. 感謝委員意見，本部分將增述於 106 年度專案成果績效自評表。 10. 感謝委員意見，本部分將從新修繕文字。	
委員二： 1. 計畫執行工作項目及內容說明完整。 2. 計畫進度達成原訂目標。 3. 自評表計畫成果發表國外期刊請於備註欄說明發表處，名稱等。 4. 自評表已開發技術，請於備註欄說明。	回覆說明： 1-2. 感謝委員肯定。 3-4. 感謝委員意見，本部分將補述於自評表。	

委員三： 1. 本計畫目標為開發圖形化網路平台，做為模擬地下水污染物移動推估之工具，計畫已完成圖資收集、圖形設計及介面、資料展示、以及質點模擬等，計畫工作內容尚佳。 2. 澳洲 National Groundwater Information 建議翻成國家地下水資訊系統，而非國際地下水資訊系統。 3. 建議能說明本計畫開發模式之定位，例如適用情境、模擬結果之準確性等，以使未來用戶能更清楚使用時機。 4. 本計畫除發表論文外，建議能針對模式驗證(包括與其他模式比對、實場數據比對、案例模擬等)，以提升所發展之模式，其技術具應用可行性。以及後續如何推廣等，說明。	回覆說明： 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員意見，本部分將修正。 3. 感謝委員意見，本部分將增述於 5.11。 4. 感謝委員意見，本部分將增述於 5.11。
委員四： 同意結案。	回覆說明： 感謝委員肯定。

106 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申請書

一、專案基本資料表

申請編號：13

專案性質		☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題		☒ 整治 ☐ 預防 ☐ 其他					
申請機構系所		國立中央大學應用地質研究所					
機構地址		桃園市中壢區中大路 300 號					
專案主持人		倪春發		職等／職稱		教授	
協同主持人		李奕賢		職等／職稱		助理研究員	
專案名稱	中文	土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發					
	英文	Development of interactive map platform for soil and groundwater data analysis and transport modeling					
	關鍵字	地下水流、污染傳輸、互動地圖平台、開放資料、模擬、空間資料分析					
執行期程		自 民 國 1 0 6 年 0 1 月 0 9 日 起 至 民 國 1 0 6 年 1 1 月 3 0 日 止					
專案主持人		姓名：倪春發		E-mail：nichuenfa@geo.ncu.edu.tw		專線：03-4227151 # 65874 手機：0989483898	
專任助理		姓名：林淇平		E-mail：chepinglin@gmail.com		專線：03-4227151 # 65851 手機：0937150285	
經費分析總表		專 案 預 估 總 經 費		金 額		編列說明	
		1.	人事費用	494,000		(1~5 項相加之 50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費	0		(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用	560,155		(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用	0		(差旅與租賃費用)	
		5.	雜項費用	45,845		(1~6 項相加之 5%為限)	
		6.	行政管理費	0		(1~5 項相加之 10%為限)	
		專案計畫申請總金額		1,100,000			

說明：

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

專案主持人：_____（簽名及蓋章） 日期：106.01.16

（請蓋上申請單位大小章）

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

106 年度專案成果績效自評表

填表日期：106 年 10 月 28 日

一、 專案基本資料

專案性質	☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☒ 整治 ☐ 預防 ☐ 其他		
申請機構系所	國立中央大學應用地質研究所	計畫主持人	倪春發
專案名稱	土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、 成果績效自評

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

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、發 表名稱、影響指數等)
A 學術產出及活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	1	0	1	100	
		(2)研討會論文	7	3	7	100	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1	100	題目: Stochastic modeling of flow and conservative transport in three-dimensional discrete fracture networks 期刊: Hydrology and Earth System Sciences
		(2)研討會論文	2	2	2	100	
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0	0	
		(2)研究報告	2	1	2	100	
	4.專著 (本數)		0	0	0	0	
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0	0	0	0	
		(2)成果發表會	0	0	0	0	
		(3)論壇	0	0	0	0	
B 人	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1	1	1	100	
		(2)技術平台	1	1	1	100	
	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	3	3	3	100	
		(2)博士	1	1	1	100	

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、發 表名稱、影響指數等)
才 培 育	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	0	0	0	
		(2)跨機構團隊	0	0	0	0	
		(3)形成研究中心	0	0	0	0	
		(4)形成實驗室	0	0	0	0	
	9.其他指標 (請自行命名)	(請自填)					

(二) 產業面

項目			目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、 技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明	0	0	0	0	
			新型/設計	0	0	0	0	
			合計	0	0	0	0	
		申 請 中	發明	0	0	0	0	
			新型/設計	0	0	0	0	
			合計	0	0	0	0	
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍生利益金(仟元)		0	0	0	0	
	3.技術移轉 (專利)	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍生利益金 (仟元)		0	0	0	0	
	4.技術移轉 (應用技術)	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍生利益金(仟元)		0	0	0	0	
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		1	0	1	100	本研究之模式模組開發結構已與環資顧問公司進行轉介與架接。
		(2)品種/系(件數)		0	0	0	0	
C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數		0	0	0	0	
		金額(仟元)		0	0	0	0	
	7.促成投資	件數		0	0	0	0	
		投資金額 (仟元)		0	0	0	0	
	8.促成取得 業界科專	件數		0	0	0	0	
		業界投資金額 (仟元)		0	0	0	0	
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						

(三) 政策面

項目		目標達成程度	申請預估數	期中達成數	期末達成數	結案達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數	1	0	1	100	協助環資國際顧問公司 SGM 系統整合
		收入(仟元)	0	0	0	0	
	2.諮詢服務	次數	1	0	1	100	
		收入(仟元)	0	0	0	0	
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策	0	0	0	0	
		(2)法規	0	0	0	0	
		(3)規範	0	0	0	0	
		(4)標準	0	0	0	0	
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)		0	0	0	0	
	5.獲得獎項(件數)		0	0	0	0	
	6.提升能源效率(%)		0	0	0	0	
	7.節能減碳效率(%)		0	0	0	0	
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

摘要

快速與正確判斷、評估與預測地下水污染傳輸機制，為污染場址管理、污染事件應變以及場址整治成功的關鍵因素之一。本計畫將延續前期計畫成果，建置以物理模式為基礎的線上分析平台，結合環保署既有土壤地下水管理資訊系統與外部單位開放資料，達到與使用者互動、即時與快速分析觀測資料空間分布與污染團遷移的目的。分析平台將考量跨作業系統、跨網頁平台操作，使相關領域調查及研究人員能在網路聯結情形下，使用辦公室或行動裝置，進行線上分析評估與模擬。為提高分析成果的空間資訊理解與評估，平台將使用 Google 地圖模組做為平台基礎架構，結合政府單位開放資料，開發資料庫介接模組、大數據資料傳輸技術、空間資料統計分析、污染團遷移物理模式分析模組及視覺展示等。在此架構下，使用者能藉由地圖資訊做為條件門檻，查詢分析與調查區位既有資料；亦可依據潛在土壤地下水污染場址通報資訊，即時以物理模式推估污染團的歷史遷移與空間分布。成果將有效率地結合既有土壤地下水管理系統與其他相關部門與機構開放資料，協助土壤地下水領域產、官、學、研相關工作推動與執行。

關鍵詞：地下水流、污染傳輸、互動地圖平台、開放資料、模擬、空間資料分析

Abstract

Efficient identification, assessment, and prediction of groundwater flow and contaminant transport behaviors have become the key process for site management, strategy design of emergency events, and site remediation. This study aims to develop an interactive online map platform for spatial data analysis and flow and transport modeling in soil groundwater systems. The physical-based analysis and modeling was expected to integrate available data in soil groundwater management (SGM) system and other government open sources. In this study, the platform was developed to compatible with different operation systems and web platform and was allowed to operate with office and mobile devices. To improve the usefulness and understanding of analysis and modeling results for users, the map platform uses the Google map for results visualizations. The users can consider map information as the criteria for data mining and spatial data analysis. Additionally, the map information also provides the base map for physical-based interactive flow and transport modeling. With the available SGM data and other data sources, the data analysis and flow and transport modeling integrated in the developed platform are expected to be efficient for most cases proposed by fields of soil groundwater contamination in industries and government and research agencies.

Key words: groundwater flow, contaminant transport, interactive map platform, open sources, modeling, spatial data analysis

目次

摘要.....	i
Abstract	ii
(一) 前言	1
(二) 研究目的	2
(三) 文獻探討	7
3.1 環境管理與風險評估	7
3.2 地圖網頁平台—地理資訊系統(GIS).....	9
(四) 研究方法與過程	17
4.1 平台開發相關技術	17
4.2 應用資料數據蒐集與開拓	19
4.3 規劃使用者介面、GIS 圖層資料庫、模擬參數與模擬範圍.....	19
(五) 結果與討論	22
5.1 使用者帳號管理	22
5.2 地理資訊平台	22
5.3 網頁前端地圖展示系統	28
5.4 圖層管理系統	41
5.5 空間插值	48
5.6 網格生成模式	49
5.7 地下水流場模擬	52
5.8 質點傳輸模擬	53
5.9 溶質傳輸模擬傳輸模擬	56
5.10 虛擬化平台伺服器系統與平行多工執行	58
5.11 結論與建議	59
5.12 後續執行工作項目說明	60
(六) 參考文獻	61

圖次

圖 1	美國休士頓於 2005 年所開發的 Houston Transtar 網站	10
圖 2	本研究平台分析架構與資料流程示意圖。	17
圖 3	平台內各功能之圖層與使用者關係。	18
圖 4	本研究使用者登入帳號與密碼操作介面。	22
圖 5	TGOS 大尺度點資料(戶政資料)。(資料來源： https://map.tgos.tw/)	23
圖 6	TGOS 小尺度點資料(戶政資料)。(資料來源： https://map.tgos.tw/)	23
圖 7	本平台大尺度地下水觀測井位置圖(現存站)。	24
圖 8	本平台小尺度地下水觀測井位置圖(現存站)。	24
圖 9	單一地下水觀測井細部資料屬性。	25
圖 10	不同單位點資料同時呈現。	26
圖 11	地下水水位時序資料。	26
圖 12	雨量站時序資料。	26
圖 13	地下水水位時序資料(月與年資料)。	27
圖 14	交通網路地理資訊倉儲系統(大尺度)。	27
圖 15	交通網路地理資訊倉儲系統(小尺度)。	27
圖 16	OneGeology 全球地質圖資料圖資。	28
圖 17	OneGeology 台灣地質圖資料圖資。	28
圖 18	mapbox streets 版本 10 圖資	30
圖 19	Mapbox outdoors 版本 10 圖資	30
圖 20	地形等高線圖資(outdoors 圖資 V10)	31
圖 21	Mapbox light 版本 9 圖資	31
圖 22	Mapbox dark 版本 9 圖資(1).....	32
圖 23	Mapbox dark 版本 9 圖資(2).....	32
圖 24	Mapbox satellite 版本 9 圖資	32

圖 25	mapbox satellite-streets 版本 10 圖資(1)	33
圖 26	mapbox satellite-streets 版本 10 圖資(2)	33
圖 27	traffic-day 版本 2 圖資	34
圖 28	交通順暢度圖資	34
圖 29	traffic- night 版本 2 圖資	35
圖 30	不同初始地圖展示座標	35
圖 31	色碼數值與顏色 RGB 關係	36
圖 32	蘭陽平園地下水分區，多邊形填色不透明度 0.5	37
圖 33	面圖層填滿白色，而邊框設定為黑色，不透明度為 1	37
圖 34	不同線段寬度，左右圖分別設定為 1 與 5	38
圖 35	線段寬度為 5，內部間隔寬度為 3	38
圖 36	虛線線段展示	39
圖 37	圓點外框寬度與填色	40
圖 38	面資料圖資填滿抬高	40
圖 39	展示圖層分類。	41
圖 40	平台操作工具。	41
圖 41	點圖層繪畫工具。	42
圖 42	線圖層繪畫工具。	42
圖 43	面圖層繪畫工具。	42
圖 44	框選既有資料庫圖層繪畫工具。	42
圖 45	刪除圖層繪畫工具。	42
圖 46	新增 2 層點圖層	43
圖 47	新增 2 層線圖層。	43
圖 48	新增 2 層面圖層。	44
圖 49	點圖層參數設定啟動介面。	44
圖 50	點圖層參數設定啟動介面。	45
圖 51	線圖層參數設定介面。	45

圖 52	面圖層參數設定介面(Physical Properties)。	46
圖 53	面圖層參數設定介面(Aquifer Elevation and Calibrations Data)。	47
圖 54	面圖層參數設定介面(Physical Properties)。	48
圖 55	Inverse Distance 操作介面按鈕。	48
圖 56	地下水井地理高程空間插值(Inverse Distance)。	49
圖 57	蘭陽平原幾何外型圖層。	50
圖 58	網格生成操作按鈕。	50
圖 59	蘭陽平原單一多邊形三角網格生成。	50
圖 60	蘭陽平原多個多邊形網格生成。	51
圖 61	執行圖層管理介面(網格生成)。	51
圖 62	流場模擬操作按鈕。	52
圖 63	測試例概念模式。	52
圖 64	測試例穩態流場模擬結果。	53
圖 65	開啟質點傳輸模擬按鈕。	53
圖 66	釋放質點方式模擬按鈕。	53
圖 67	單點質點傳輸模擬結果。	54
圖 68	折線質點傳輸模擬結果。	55
圖 69	放射源質點傳輸模擬結果。	55
圖 70	多邊形質點傳輸模擬結果。	56
圖 71	溶質傳輸測試例之穩態流場分佈。	57
圖 72	初始濃度濃度團位置。	57
圖 73	濃度團 30 天遷移後情形。	58
圖 74	虛擬化平台多工執行序。	59

表次

表 1	台灣與國際水文地質相關網路展示平台	3
表 2	國內外提供地圖圖台之 Web GIS 網站	12
表 3	國內外專門展示資訊用的 Web GIS 網站列表	13
表 4	國內外具備使用者互動功能的 Web GIS 網站列表	16
表 5	工作執行甘特圖	21

(一) 前言

目前土壤地下水相關調查工作普遍以現地調查數據（土壤採樣及地下水體之物理及化學量測）輔以各類調查方法（例如：地球物理探測、統計分析、化學分析、水井水力學分析、污染擴散移流延散分析、數值模擬等方法）(Li and McLaughlin, 1991; Li and McLaughlin, 1995; Bair and Lahm, 1996; Simmons and Narayan, 1997; Vieux, et al., 1998; Harman, et al., 2001; Barry, et al., 2002; Mehl and Hill, 2002, 2004; Prommer, et al., 2002; Bachu and Adams, 2003; Pruess, 2005; Fadlelmawla and Dawoud, 2006; Mao, et al., 2006; Xu, et al., 2006; Dickinson, et al., 2007; Farajzadeh, et al., 2007)推估污染物分布，以界定污染來源及含水層整治方向。然地下水水質優劣與人類活動息息相關，除自然界本體之污染源，如地質沉積物之滲出液，增加地下水中氯化物、硫化物、硝酸鹽、鐵或其他無機化合物的濃度外，其主要污染源大部分來自廢棄物處置或意外洩漏之相關活動設施，如工業上排放廢水、儲槽/管線之洩漏、廢棄物堆放或掩埋；都市的家庭污水、下水道管路及化糞池破損外洩的污水、掩埋場滲出水洩漏；農業及畜產養殖業上所排放之化學肥料、農藥殘餘物質、改良土壤的藥劑等，皆為直接或間接污染地下水之根源，而污染物於含水層中隨地下水擴散與遷移，無法從單方面之檢測有效分析與推估含水層之污染。一般來說，地下水的污染事件大部分皆未能事先查覺，直到飲用或使用到受到污染之地下水並產生危害後才警示到地下水已遭受污染。地下水由於流速緩慢而導致污染物需要經歷長久的時間（十幾年或數十年）才會在某一特定的使用區或採樣區被偵測到。污染物經過地下水十幾或數十年的流動，將有充分之時間於含水層中遷移，歷時長久加上污染範圍的擴大，往往已無法確知其污染源頭以及污染源系統（如任意排放源、多重排放源、持續排放污染源或已結束排放），且若污染物之排放源若已移除或轉換，更增加整治執行及後續法務處置困難度。

既有土壤地下水污染觀測資料應蒐集整合過去台灣各地常時監測與場址資料，除了土壤地下水管理資訊系統，亦應涵括含括其他單位如內政部地理資訊平台、環境水質監測資訊網、經濟部中央地質調查所水文地質資料庫、水文資訊網整合系統、經濟部水利署地理資訊倉儲中心等，整合應用於土壤地下水污染的調查、分析、研究與管理相關議題。因此，各資料庫跨平台資料整合呈現，可將既有資料價值最大化。若再輔以空間資料分析與即時互動傳輸模擬，可在既有資料庫的資源下，提供土壤地下水相關產業評估、調查與管理分析工具。

(二) 研究目的

目前台灣於污染防治或是土水資料展示網路平台計有 TGOS 地理資訊圖資雲服務平台、全國環境水質監測資訊網、土壤及地下水污染整治網、經濟部中央地質調查所水文地質資料庫、水文資訊網整合服務系統、經濟部水利署地理資訊倉儲中心等；而國外較為知名之相關平台系統則例如有瑞士聯邦理工學院水產科學與科技所開發之全球地下水評估平台(Groundwater Assessment Platform, GAP)、布加勒斯特土木工程科技大學地下水工程研究中心所開發之城市地下水管理地理空間圖資與服務平台(Geospatial Data and Services Platform, Geo platform)、澳大利亞政府所建構之國家地下水資訊系統(National Groundwater Information System, NGIS)，相關資訊如表 1 所示。上述的土壤與地下水或水文地質資料相關網路平台僅能夠以展示資料為主，或進行簡易之環域分析及資料統計分析，然資料點資訊蒐集與建立有其時間與空間之限制，無法展現如地下水位之流場狀況、水文地質參數之空間分布等；再進一步，以地下水污染為例，通常以觀測井（點位）資訊之觀測值表示為該區域的受污染狀況，但污染物之傳輸並非以點對點，而為具時空變遷特性之面型（或考慮深度之三維體）污染。

為提昇國內產、官、學、研在土壤及地下水整治、預防與管理能量，本研究將建構土壤及地下水網路地圖整合平台，除展示國內已公佈開放資料，可經由此平台將資料庫資料提取特定空間資料，進行空間資料分析及地下水流場與傳輸模擬。其中，空間資料分析除提供基本統計資料參數外，亦將開發空間資料相關性分析模組如空間資料地質統計分析(geostatistical analysis)及空間迴歸及插值分析(regression or interpolation)等。土壤地下水流動與污染傳輸模擬則先考慮飽和含水層的流動與傳輸數值模式分析模組建構，平台將介接美國地質調查所(USGS)開發的 MODFLOW 公用模式模擬地下水流動，使用美國環保署(EPA)開發的 MT3DMS 作為傳輸分析模組。本研究開發資料庫平台，預期可以將數位資料透過各圖層展示於 Google 地圖介面，並設計模組式接口，可允許持續擴充多元資料庫、空間資料分析及流傳模擬模式，可讓專業空間分析或模式開發者測試與推廣及其模式。平台將提供一溝通媒介，透過群體合作方式，結合不同領域的土壤及地下水相關人員能量，建構國內處理土壤地下水污染問題之判別、應變、規劃與管理產業結合鏈。

表 1 台灣與國際水文地質相關網路展示平台

平台名稱	屬性	研發/ 管理單位
TGOS 地理資訊圖資雲服務平台 http://tgos.nat.gov.tw/tgos/web/tgos_home.aspx	所有政府開放地理空間相關資料	內政部 資訊中心
全國環境水質監測資訊網 http://wq.epa.gov.tw/Code/?Languages=	水質資訊，涵蓋河川、水庫、海域、 地下水、海灘等	環保署
土壤及地下水污染整治網 http://sgw.epa.gov.tw/public/ContaminatedSitesMap/Default.aspx	土壤品質查詢、地下水品質查詢、 區域性監測井查詢等	環保署
水文地質資料庫 http://hydro.moeacgs.gov.tw/index.htm	地下水分區鑽探資料、岩心影像、 井柱狀圖等	中央地質 調查所
水文資訊網整合服務系統 https://www.wra.gov.tw/lp.asp?CtNode=7339&CtUnit=321&BaseDSD=7	歷史水文、即時水文、水文分析等	水利署
水利署地理資訊倉儲中心 http://gic.wra.gov.tw/gic/HomePage/Index.aspx	河川水文、地下水文、水庫保育、 防洪排水、環境資源等	水利署

表 1(續) 台灣與國際水文地質相關網路展示平台

平台名稱	屬性	研發/ 管理單位
開發之全球地下水評估平台 Groundwater Assessment Platform, GAP http://www.gapmaps.org/gap.protected/	涵蓋全球性氣候、水情與地質圖資	瑞士聯邦理工學院水產科學與科技所
城市地下水管理地理空間圖資與服務平台 Geospatial Data and Services Platform, Geo platform https://www.geoplatform.gov/	地下水位分析、水質化學分析、水文地質分析等	布加勒斯特土木工程科技大學地下水工程研究中心
國際地下水資訊系統 (National Groundwater Information System, NGIS) http://www.bom.gov.au/water/groundwater/ngis/	國際含水層結構、水情資訊、水文活動等	澳大利亞政府

依據本計畫研究目的，本研究規劃四大工作項目，包括：蒐集地下環境相關參數資料，建置環境參數資料庫；建構創新網路版土壤及地下水資訊展示平台；開發線上空間資料分析平台；以及開發線上地下水水流與污染團溶質傳輸模擬平台。各工作項目工作內容簡述如下：

1. 蒐集地下環境相關參數資料，建置環境參數資料庫：

延續上年度計畫，本平台已完成蒐集許多開放資料，其中包含環保署土壤地下水管理資訊系統(SGM)中結構性資料為基礎，更函請外部單位提供開方資料如水利署與地質調查所。由於各單位資料格式皆無法統一，本研究需要統整資料格式，並且設計未來可以擴充其他格式資料。將工作重點放在平台架構開發以及與分析模擬模式介接，在此開發完成的架構下，未來可進一步應用其他分析模式於此平台上。

2. 建構創新網路版土壤及地下水資訊展示平台：

過去已有需多單機版使用介面模擬平台建置，但鮮少有研究致力於開發網路版模擬平台。在這個數據爆炸的世代，巨量數據的計算資源需求，已經無法要求單機為了局部模擬區域，而準備龐大儲存空間設置全台灣完備資料庫；且類似水位、污染物濃度、土地使用狀況以及土地列管狀況等資料，屬於時空資料，絕非單一時間點空間資料，資料量更是龐大。因此，為了讓既有資料作多面向的應用，應發展具有處理巨量數據的網路平台作為首要任務。本研究以地圖資訊平台為基礎，開發具有創新技術的網路資料蒐尋與擷取技術，除了改善以往利用 Google 地圖既有繪畫點、線、面資料傳輸技術瓶頸，亦提供快速呈現空間資料分析與地下水水流與溶質傳輸模擬結果。

3. 開發線上空間資料分析平台：

空間資料統計分析已是成熟技術，然目前國內已知的資料平台多僅作為資料結果空間點的呈現，此亦為資料呈現的最基本形式，對於資料的後端使用者，往往需要進一步獲得資料的統計資訊與分布結構，作為判斷分析的依據。本研究將在既有空間資料分析技術的基礎上，介接外部資料分析模組，再配合適當演算法，建構空間資料分析平台。

4. 開發線上地下水水流與污染傳輸模擬平台：

為提昇土壤及地下水污染調查、分析、整治與管理技術，確切掌握地下水流向與污染團傳輸路徑為整體技術重心。本計畫中，預期建構的地下水水流與污染傳輸模擬平台將具有：(1) 介接國際上常用的開放源分析程式，如美國地質調查所(USGS)開發的 MODFLOW 公用模式模擬地下水流動，美國環保署(EPA)開發的 MT3DMS 作為傳輸分析模組。(2) 多元模式分析接口模組，模組可提供相關模式開發者，測試其開發模式快速連結平台所建置的環境參數資料庫，將模式應用於真實污染場址。(3) 跨系統跨平台分析架構，此跨平台架構可允許多數辦公室及行動裝置使用，提高土壤地下

土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發
水相關工作者分析與使用的自由度。

(三) 文獻探討

3.1 環境管理與風險評估

針對污染來源鑑定所發展出專門之技術及學問可通稱為環境法醫(Environmental Forensics)，其關注領域大略包含：污染行為人／源、何時污染、如何污染、污染範圍、採樣及試驗結果之正確性與否、證據充足性(目擊者或歷史文件)、污染清除所需成本、人體暴露污染程度、相關團體之責任與賠償應如何分配計算等(Rowan, et al., 2012; Fenech, et al., 2013, Miralles-Marco and Harrad, 2015)。地下水污染源常用之判定技術例如污染歷史調查、指紋圖譜比對標準程序-Nordtest 方法、化學指紋分析技術、特徵化合物分析、碳同位素分析、生物指標化合物分析及風化過程分析等方法(宋明一等人, 2007)，此些方法雖然可有效以專業數據進而判定污染源，但其整治前備查作業及後續執行工作涉略的學門與技術廣泛且艱深，所需花費之人力、時間與經費皆相當可觀，並且污染物之傳輸與地下水流場具直接相關性，若無地下水流場背景資料庫及妥善之數值模式建立，則無法適當描述積時冗長的污染物傳輸以及用其溯源標的污染場址。有鑒於此，若在場址調查階段即適當利用電腦數值模式進行污染物溯源追蹤，即可有效降低污染物溯源調查範圍，提高土水工作人員追查污染源之效率。除此之外，溯源追蹤之模擬結果亦能增加工作人員對於場址中流動與傳輸機制的瞭解，若配合環保署建置之「環境污染物指紋資料庫」，則有利於整治及後續監測之規劃。

此外，在災害防治的觀點之下，為了預先保護地下水使用地區的水源，使地下水源不受污染源影響，建立一個地下水水井保護區(wellhead protection area, WHPA)亦為地下水資源開發或管理的重要工作(Vieux et al., 1998; Harman et al., 2001; Fadlelmawla and Dawoud, 2006, Ferrante, et al., 2015)。地下水資源保護區之劃定，為掌握當地大尺度水文地質條件之基礎上，並按級別進行地下水保護區之劃分，以水源補注做為基本判定，並行水質與水量之規判，例如以水文地質結構、地下水流網絡或地下水水質特徵等定義其範圍，以及利用氫氧同位素之質量平衡分析探討不同補注水源所占比率，或以地下水位歷線分析評估地下水補注量在空間上之分配等。然而，除了在地下水水源區保護上，在普遍利用地下水之小尺度區域則較欠缺地下水保護之概念(例如工業區、農地或其他使用地下水情況方面等)，對於高度開發使用地下水的區域中，當然相對提高其污染之風險。地下水水井捕集區(well capture zone)乃指抽水井附近之區域，其區域定義為在某一特定時間內(例如：一年、五年或十年)地下水可由抽水井抽出的水源來源或範圍，且能從其推論在捕集區內污染物到達抽水井時間與區域；地下水水井捕集區除了可以界定抽水井的水來源外，另一目的即為保護特定水井地下水水源，防止該區域內的任何污染行為，即使污染行為已經發生，也可預測污染物到達水井的時間並且做出必要的應變處理措施，因此制定出完整、正確且精準的地下水水井捕集區為一重要工作(Kompani-Zare, et al., 2005; Riva, et al., 2006; Stichler, et al., 2008; Ni, et

al., 2011; Bonton, et al., 2012; Molson and Frind, 2012; Klammler, et al., 2014; Zarei-Doudeji and Samani, 2014; Samani and Zarei-Doudeji, 2015)。

最早定義地下水水井捕集區的定率方法例如製圖法 (U.S EPA, 1994; Paradis et al., 2007)或解析解法(Bear and Jacobs, 1965; Todd, 1980; Javandel and Tsang, 1987; Zhang, 1998, 1999; Shan, 1999)。製圖法較適用在規劃淺層含水層的水井保護區，其優點為經濟上較划算並且較準確，但一旦地質與地形複雜化例如為石灰岩地質或是破裂帶含水層上，其所要花費的成本變高。解析解法則以水流連續方程式為基礎，以偏微分方程式或代數方程式來描述地下水水流機制，建立提供早期計算機未發達的時代對水井捕集區初步的範圍推估。優點為低成本，可由較少的資料去分析使用，並且快速簡單，不需要複雜的技術條件，但只能夠在特定條件上使用。雖然解析解方法後續的研究考慮了更複雜的條件（例如：增加流場複雜程度），這些方法雖然快速，計算所需的含水層參數相對較少，自然其所推估出的水井捕集區亦較不準確，若遇到更複雜的水文地質條件就變得難以應用。定率方法中的數值模式例如 MODPATH、FLOWPATH、GWPATH 等推求水井捕集區的方式是目前較為研究及工程應用者使用的方法(Franz and Guiguer, 1990; U.S EPA, 1991; Kinzelbach et al., 1992; Schafer, 1996; McDonald and Harbaugh, 1998; Pollock, 1998; Rock and Hans, 2002; Zhang and Bennett, 2002)。這些數值模式大部分都架構在定率方法中的水流模式之上，例如 MODFLOW，進而利用此地下水水流流場，以質點追蹤方法，由抽水井周圍釋放質點，沿流線方向追蹤獲得特定時間的水井捕集區或水井保護區。部分研究後來發展出同時使用解析解法搭配數值法求解的半解析解方法(Shafer, 1990; Bair, 1991; Haitjema et al., 1994)，假設其所要規劃的水井捕集區區域在一理想的位置上，利用簡易的地下水水流系統與補注條件規劃水井捕集區，例如 Haitjeima 在 1994 年所發展出的模式 WhAEM 可運用在規劃區域地下水流場的水井捕集區，此方法應用解析解可降低數值誤差，提高推估水井捕集區的精確度，但其所考慮的參數也相對較少，只能夠在特定條件上使用與規劃。

利用序率方法推估地下水水井捕集區為近幾年來新提出的推估方法，所謂序率模式是由機率來主控水文量的發生過程，其中統計模式著重於處理觀測時距內，某一特殊事件之發生機率，序率模式注重於分析水文時間序列與空間特性之隨機性質。蒙地卡羅模擬法為近幾年來較多學者所使用的方法(Franzetti and Guadagnini, 1996; Guadagnini and Franzetti, 1999; Van Leeuwen et al., 1999; Kunsrmann and Kinelbach, 2000; Lu and Zhang, 2003; Bakr and Bulter, 2004, 2005; Zhang and Lu, 2004; Stauffer et al., 2005; Junstmann and Kastens, 2006)，因其為序率模式當中推估水流流場之不確定性的最直接的方式，但利用此方法去制定一個水井捕集區存在著幾個問題，那就是它的計算所需資源太高，當一個蒙地卡羅隨機場產生，利用所產生的含水層參數代入地下水水流控制方程式解出流場，將質點釋放在其中並且計算質點的位移軌跡，直到質點抵達邊界或是抽水井而停止追蹤，需要相當大量的數值計算，並且此僅止於單一抽水

井而言，倘若再增加抽水系統後或是提高流場複雜程度，蒙地卡羅法的模擬方式顯得難以應用。除了需要大量的計算資源以外，蒙地卡羅法存在著需要相當大量的隨機場獲得次數才可收斂的問題，往往需要數千次至數萬次的隨機場獲得才可解析出流場的統計特性。由於使用蒙地卡羅法推估水井捕集區需要耗費相當大的計算資源，加上許多未解決的問題，於是近年來有利用一階近似法的推估方法提出，本法希望能利用較少的計算資源而達到與蒙地卡羅法近似的解，但根據過去研究表示，利用一階近似法求解含水層參數不確定性同樣需要耗費大量的計算資源，在過去研究當中，往往將一階近似法轉換為動差方程式法解析捕集區變異性(Guadagnini et al., 2003; Hernandez et al., 2003; Kunstmann and Kastens, 2006; Riva et al., 2006)，但此方法需要夠精細化之網格才能解析夠精確之動差方程式，倘若求解大尺度流場問題，空間上之網格數將變得非常大，自然增加其計算量。同樣是一階近似法中，利用傅立葉轉換的譜方法將變異性依不同的頻率離散，簡化各頻率的解，增大求解的網格求解水力傳導係數的變異性(Li et al., 2004; Ni and Li, 2005, 2006, 2008)，此法可有效減少計算資源，使譜方法求解含水層水力參數變異性較蒙地卡羅法與動差方程式法來得更有效率。利用譜方法進行方程式簡化，可求得一類解析解之近似解(Ni and Li, 2005, 2006, 2008)，減少求解數值方法的複雜性與計算難度，提高求解水流流場變異性之效率，作為推估水井捕集區之用。利用序率方法推估水井捕集區主要有兩個目的，第一個目的是為了量化資料點不足所造成的不確定性(uncertainty)，另一個目的則是希望考慮含水層參數所造成的不確定性，此不確定性將作為規劃設計時風險評估的重要依據。

3.2 地圖網頁平台—地理資訊系統(GIS)

地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)是一門結合地理學與地圖學的綜合性學科，為一種具備空間資訊形式的資料管理系統(Database Management System, DBMS)，主要用途為輸入、儲存、查詢、分析與顯示空間資料，以作為解釋空間資料的工具之一(Ian 2010)。GIS 在人類歷史上一一直以手繪地圖的形式存在，直到 1967 年加拿大政府與 IBM 合作發展 CGIS (Canada Geographic Information System) 以幫助政府管理土地開發利用與自然資源的問題開始，接續美俄冷戰時期兩國對於間諜衛星圖資處理的需求，以及 1970 年代 LandSat 開始使用數位資料等發展以來，人們開始認識到應用數位資料的 GIS 能有效地使用於許多領域（例如環境監測、都市規劃或是災害應變等）並幫助管理者制訂相關政策(Yeo and Yee 2016)。1980 年代後，在個人電腦的普及、電腦軟體價格的下降與商用 GIS 軟體的開發下，原本僅用於政府管理的 GIS 便開始被民間使用於更多的商業用途。而 1987 年英國的 Chorley 報告(Great Britain. Committee of Enquiry into the Handling of Geographic 1987)更是政府決心重視並發展 GIS 的里程碑。

但由於 GIS 對於不同類型的使用者有不同的用途，至今並未有 GIS 的通用定義，但仍大致可將 GIS 分為 GIS 軟體、GIS 圖資、GIS 社群以及應用 GIS 的能力等四個主

土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發

要部分(Longley 2005)。然而傳統的 GIS 軟體(例如 gvSIG、ArcGIS、GRASS 或 QGIS)皆使用個人電腦進行 GIS 圖資的儲存、展示、分析或是計算。使用這些軟體除了需要具備一定的技術訓練外，儲存於個人電腦內的 GIS 圖資亦不便與他人共享。這些限制除了造成觀測資源的重複，並增加了資料擁有者與其他競爭者之間的資訊鴻溝(Digital divide)。為了處理資料擁有者與其他人間的資訊鴻溝，自 1960 年代的世界資料中心(World Data Center)以來便有將科學資料分享予大眾自由使用的概念，Council (1995)更提到地球科學方面的觀測資料應為大眾所擁有。然而由於技術限制以及資料複印與保存的花費，這些公開的資料並未如預期般地被廣泛使用。Chorley 報告(Great Britain. Committee of Enquiry into the Handling of Geographic 1987)更指出圖資的來源、標準以及保密都是推廣的問題之一。

直到 21 世紀，公開資料無法被大量使用的情況才在網際網路技術以及儲存裝置的發展，Open Data 運動以及 2008 年美國總統歐巴馬(Barack Obama)的就職演說的推波助瀾下，世界各地的政府相關單位才開始在網路上公開與施政相關的 GIS 圖資(Lathrop and Ruma 2010)。為因應此趨勢，台灣行政院在 2015 年 7 月通過「ide@ Taiwan2020（創意臺灣）政策白皮書」，並於數個月內開放超過一萬筆政府相關 GIS 圖資。在大量 GIS 資料陸續開放並共享，與互動式網際網路技術（例如 AJAX(Asynchronous JavaScript and XML)、ASP(Active Server Pages)或是 JSP(Java Server Pages)) 快速演進的狀況下，許多專門針對圖資進行加值應用，並具備圖資展示與分析技術的網站便被發展出來，這種結合網際網路與 GIS 的網站便被視為 GIS 的一種，稱作 Web GIS(Li et al. 2011)。如圖 1，美國休士頓政府於 2005 年所開發的 Houston Transtar 網站便是 Web GIS 剛起步時的早期應用之一。

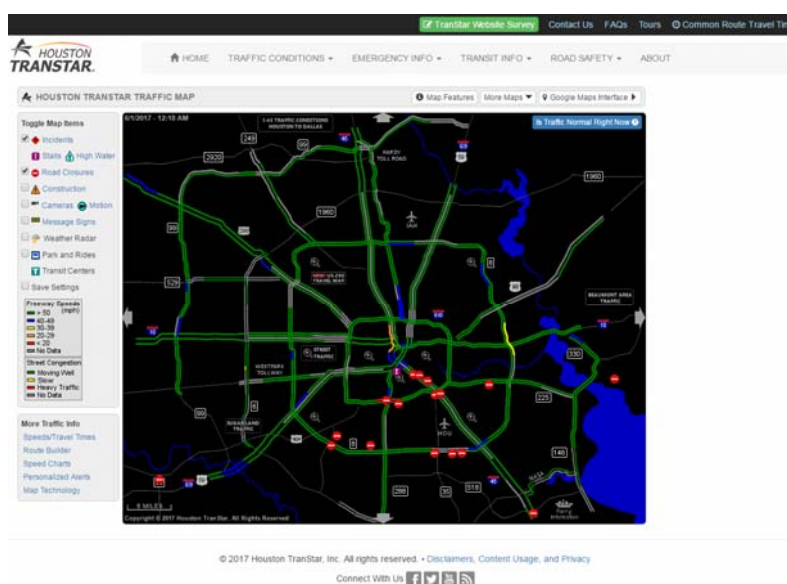


圖 1 美國休士頓於 2005 年所開發的 Houston Transtar 網站

(網址：<https://traffic.houstontranstar.org/layers/>)

根據 Esri 公司(Environmental Systems Research Institute, Inc.)的定義，Web GIS 為分散式資訊系統(Distributed Information System)的一種，系統中最少包括有一個伺服器端(Server)與客戶端(Client)，其中伺服器端必須為支援 GIS 與 HTTP(Hypertext Transfer Protocol)的伺服器，客戶端則可為網頁瀏覽器(例如 Internet Explorer, Mozilla Firefox, Apple Safari, Google Chrome 等)、桌上型應用程式或是行動裝置(例如智慧型手機或平板)其中一種。在此架構下，Web GIS 整體而言將較傳統 GIS 軟體多了幾個好處(ArcGIS 2012)：

1. 地理距離限制消除：由於 Web GIS 使用 HTTP 協議，為全球應用最為廣泛的網路協議，因此當伺服器端發布 Web GIS 應用後，即可提供給全球各地客戶端使用。而客戶端方面亦僅需網頁瀏覽器，即可使用全球各地的 Web GIS 網站，成功地消除了地理距離上的限制。
2. 廣大數量的使用者：傳統的 GIS 軟體一次僅能提供一個操作者使用，而 Web GIS 則可提供全球各地的使用者進行多人同時操作。因此 Web GIS 將較傳統 GIS 具備更高的效能以及擴展性。
3. 優異的跨平台能力：由於 Web GIS 所使用的 HTTP 協定被絕大部分的網頁瀏覽器所支援，而目前全球絕大部分電腦的作業系統亦皆支援使用網頁瀏覽器。因此不論電腦作業系統或網頁瀏覽器種類，皆可使用 Web GIS。
4. 減少花費：由於 Web GIS 可提供多人同時操作，因此 GIS 供應商不需要為了各個客戶購置不同的 GIS 軟體，僅需建置一套 Web GIS 即可供應所有客戶使用。
5. 容易使用：傳統 GIS 軟體多半開發給專業人員使用，為了熟悉軟體，人員往往需要經過一定時間訓練才能熟悉軟體功能。Web GIS 多半為了一般人士使用，使用介面會朝簡易化、直覺化與方便化等方向進行設計，因此 Web GIS 在使用上會較傳統 GIS 軟體容易許多。
6. 更新迅速：傳統 GIS 軟體更新時，須針對個別有安裝軟體的電腦進行更新操作，而 web GIS 則僅需更新伺服器端，客戶端即可獲取最新資訊。這樣的特性也使得 Web GIS 特別適合用於即時資料的展示。
7. 應用廣泛：由於 Web GIS 不像傳統 GIS 一樣受到電腦、軟體功能及人員數量的限制。因此 Web GIS 可針對不同類型使用者的需求進行開發，形成相當多元的延伸應用，例如尋找朋友、標示特定店家、災害防治等皆是目前已開發出來的 Web GIS 案例。

為能順利進行 Web GIS 介面開發，本工作蒐集並參考國內外許多成功的 Web GIS 開發案例。其中這些開發案例大致可分為三種類型，第一種 Web GIS 網站提供地圖圖台，並利用 API(Application Programming Interface)或其他銜接介面以提供其他網站能

使用該網站的地圖圖台，本工作將此類型網站列如表 2。第二種網站則利用表 2 的地圖圖台進行展示，讓使用者在圖台上進行操作以展示相對應位置的 GIS 資訊，本工作將國內外此類型的網站整理並列於表二。此種網站又可分為即時資料的展示與資料庫資料的展示兩種類型，如表 3 中「i-Environment」與「Windy」等網站即可依照使用者所在位置，即時於地圖圖台上展示現有觀測資料；而表 3 內大多數其他網站則選擇僅利用地圖平台展示伺服器內地圖圖資，以提供使用者查閱或下載。第三種 Web GIS 網站除了展示地圖圖台之外，亦利用圖台上其他功能，對圖資執行進階分析或其他加值應用，本工作將此類型的網站整理並列於表 4。其中如「Adrift」與「WHAT」即可藉由使用者滑鼠在地圖上的點擊位置得到參數，並執行簡單模擬而展示成果。而「OpenStreetMap」與「原住民環境知識匯集平台」則是藉由讓使用者上傳資料並回饋給平台，使得平台能夠提供更多資源給其他人所使用。

然而，上述類型 Web GIS 網站都有各自的優缺點，例如圖台供應類型的網站需要耗費大量金錢跟資源進行底圖資料蒐集與維護，因此往往只有大型公司或政府機關能提供此服務。而圖資展示的網站能提供使用者相當多的 GIS 圖資，但是網站與使用者間並無太多互動，且使用者無法回饋給圖資提供者，造成網站提供者仍須耗費相當大的資源執行後續圖資的維護與更新。而第三類與使用者互動的網站卻多半僅針對特定議題進行開發，且往往無法提供 GIS 圖資予使用者。因此本工作在此希望能結合圖資展示與互動網站的優點，使用者除了可在本工作所開發網站上面進行 GIS 圖資調閱外，另外本網站亦提供互動功能讓使用者能在網站上進行模擬。更重要的是，本網站內的互動模擬所需參數皆採用自 GIS 圖資的內容，因此能真正地結合這兩種 Web GIS 網站類型。另外本工作在本身既有 GIS 圖資外，亦設計了能讓使用者上傳自行調查的資料，除了能達到讓台灣各地相關勘查資料的共享，亦能進一步地增加平台自身資料量，以期能達到更好的資料提供品質。

表 2 國內外提供地圖圖台之 Web GIS 網站

名稱	網址	所屬單位
World Wind	https://worldwind.arc.nasa.gov/	美國 NASA
OpenStreetMap	https://www.openstreetmap.org/	OSM 基金會
TGOS	https://map.tgos.tw	內政部資訊中心
Bing Maps	https://www.microsoft.com/maps/	美國微軟
OneGeology	http://www.onegeology.org/	美國 Esri
Mapion	https://www.mapion.co.jp/	日本
MapBox	https://www.mapbox.com/	美國
Google Map	https://www.google.com.tw/maps	美國 Google

表 3 國內外專門展示資訊用的 Web GIS 網站列表

名稱	網址	所屬單位
公路防災資訊系統	https://bobe168.tw/	交通部
交通網路地理資訊倉儲系統	https://gist.motc.gov.tw/Gis_Platform	交通部
防災資訊服務網	http://fhy.wra.gov.tw/fhy/	水利署
地理資訊倉儲中心	http://gic.wra.gov.tw/gic/HomePage/Index.aspx	水利署
i-Environment	https://ienv.epa.gov.tw/	環保署
土壤液化潛勢查詢網	http://www.geologycloud.tw/map/liquefaction/zh-tw	地調所
地質雲	http://www.geologycloud.tw/desktop/zh-tw	地調所
地質資料整合查詢	http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm	地調所
台灣活動斷層	http://fault.moeacgs.gov.tw/MgFault/Home/pageMap?LFun=3	地調所
國土資訊系統	http://ngis.moea.gov.tw/NgisGis/	經濟部
農地資訊查詢系統	http://taliss.coa.gov.tw/ALIES/index.aspx	農委會
林火危險度預警資訊系統	http://forecast.forest.gov.tw/Forecast/	林務局
下水道圖資整合資訊系統	http://sewergis.cpami.gov.tw/shortpath/sewer/main.htm	營建署
地籍圖資網路便民服務系統	http://easymap.land.moi.gov.tw/R02/Index	內政部
地名資訊服務網	http://gn.moi.gov.tw/geonames/index.aspx	內政部
不動產交易實價查詢服務網	http://lvr.land.moi.gov.tw/login.action	內政部
花蓮縣地理資訊倉儲平台	http://gis.hl.gov.tw/hlgis/	花蓮縣政府
苗栗縣地理資訊倉儲平台	http://gis.miaoli.gov.tw/dwhweb/map/map.aspx	苗栗縣政府

表 3(續) 國內外專門展示資訊用的 Web GIS 網站列表

金門縣都市計畫整合資訊系統	http://urban.kinmen.gov.tw/kmgis_new/publicweb/index.aspx	金門縣政府
台北市電子地圖	http://maps.taipei/	台北市政府
線上地圖校正系統	http://mapwarper.rchss.sinica.edu.tw/	中研院
文化資產導覽系統	http://nav.boch.gov.tw/cpl/bochmap.aspx	文化資產局
考古文物 3D 資料庫	http://3d.nmp.gov.tw/	台灣史前文化博物館
國家發展規劃應用分組平台	http://maps.ngis.org.tw/TGISWeb/TaiwanGIS2.aspx	國家發展委員會
智慧決策雲	http://www.makoci.com/	台灣地理資訊中心
停水地址定位查詢	http://61.221.166.140/pubmap	台灣自來水公司
ELVIS(Environmental Visualization and Information System)	http://wisdom.eoc.dlr.de/Elvis/	德/越合作 WISDOM
SLIP(Shared Land Information Platform)	http://slip.landgate.wa.gov.au/	澳洲政府
Swiss Geoportal	https://map.geo.admin.ch	瑞士政府
HydroTerre	http://hydroterre.psu.edu/HTML5/HydroTerre/HydroTerre.html	美國賓州大學
HydroAlp	http://webgis.eurac.edu/hydroalp/	義大利 EURAC
Parcel Lookup Tool	http://sdgis.sandag.org/	聖地牙哥政府
Windy	https://www.windy.com	私人
Sea Level Rise	https://coast.noaa.gov/slr/	美國 NOAA
Environment Map	http://apps.environment-agency.gov.uk/wiyby/	英國環保署
1Map	https://1map.co.za/	南非

表 3(續) 國內外專門展示資訊用的 Web GIS 網站列表

Environmental Data Explorer	http://geodata.grid.unep.ch/	UNEP
National Geophysical Data Center	https://maps.ngdc.noaa.gov/	美國 NOAA
OpenTopography	http://www.opentopography.org/	美國
Nature Conservancy	http://www.tnclands.tnc.org/	美國
Global Climate Monitor	http://www.globalclimatemonitor.org/	西班牙塞維亞大學
GEODATA	http://geodata.gov.gr/maps	希臘
GeoGratis	http://www.geogratias.gc.ca/	加拿大
GeoDiscover	https://geodiscover.alberta.ca/	加拿大
SEDAC	http://sedac.ciesin.columbia.edu/mapping/viewer/	美國 NASA
Natural Resources Canada	http://atlas.gc.ca/toporama/en/index.html	加拿大
DataBC	http://www2.gov.bc.ca/gov/content/home	英國
GIS Dataset Brasil	http://fititnt.github.io/gis-dataset-brasil/	巴西
MD iMap	http://www.dhcd.state.md.us/GIS/project_core_v2/index.html	美國馬里蘭州政府
Storm Surge Simulator	http://earl.cis.fiu.edu/gic/	美國佛羅里達國際大學
Surging Seas	http://sealevel.climatecentral.org/	美國氣候中心
機票訂購系統	https://www.flybe.com/route-map/	英國弗萊比航空
Rome2Rio	https://www.rome2rio.com/	澳洲 Rome2Rio

表 4 國內外具備使用者互動功能的 Web GIS 網站列表

名稱	網址	所屬單位
NUKEMAP	http://nuclearsecrecy.com/nukemap/	美國史蒂文斯理工學院
ROOMA(Rapid Offline-Online Mapping Application)	建置中，但已發表至期刊 (Olyazadeh et al. 2017)	瑞士洛桑大學
OpenStreetMap	https://www.openstreetmap.org/	OSM 基金會
Adrift	http://www.adrift.org.au/	英國倫敦帝國學院
原住民環境知識匯集平台	http://iknowledge.tw/zh-hant/geodata	台灣師範大學
WHAT(Web based Hydrograph Analysis Tool)	https://engineering.purdue.edu/mapserve/WHAT/	美國 USGS
Radio Garden	http://radio.garden/	私人

(四) 研究方法與過程

無論在於地理空間資料平台，或是地下水數值模擬研究領域，都希望能夠整合現實銜接既存資料庫，完整資料整合使用，並且與模擬結果相套疊，讓其他資料使用者能夠透過平台，呈現與整合各領域成果，作為政策決定與規劃、學者研究背景與比對資料庫，或是一般業者依據地理資訊與模擬結果整合判斷相關執行業務。基於此理由，本研究目的在於開發任意裝置即可使用之線上平台，平台以跨作業系統、跨瀏覽器與跨行動裝置此三大方向作為平台之規劃目標。圖 2 為本研究規劃的平台架構圖，在平台架構中共分為 8 個子區域，其中有些區域是互相溝通，但也有單向式傳遞資訊。其中各區域之工作則可分為使用者操作介面溝通、GIS 圖層資料庫搜尋資料與模擬結果可視化、使用者介面設計、資料庫參數空間插值與統計分析、網格離散化、執行序率捕集區模擬程式與模式輸出模擬結果等項目，期中各項目之執行甘特圖如表 5 所列。

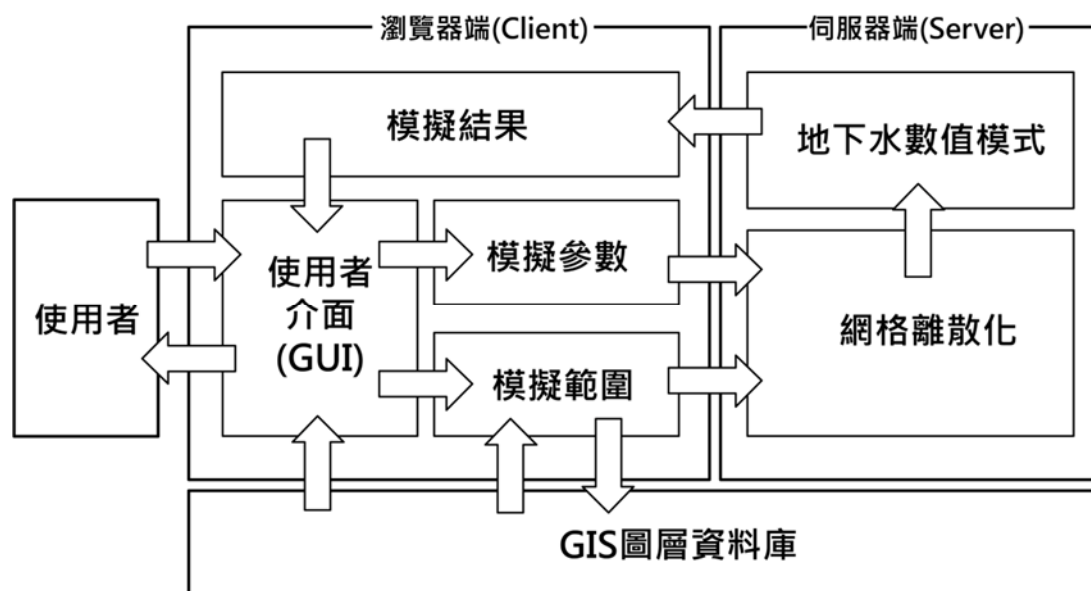


圖 2 本研究平台分析架構與資料流程示意圖。

4.1 平台開發相關技術

為了實現地下水資料庫系統整合與模擬結果視覺化，本計畫實作各項參數巨量資料系統整合與視覺化流程將如圖 3 所示。我們將 Groundwater Model 功能元件與 GIS Layer database server 整合在 Google Map Visualization Platform。

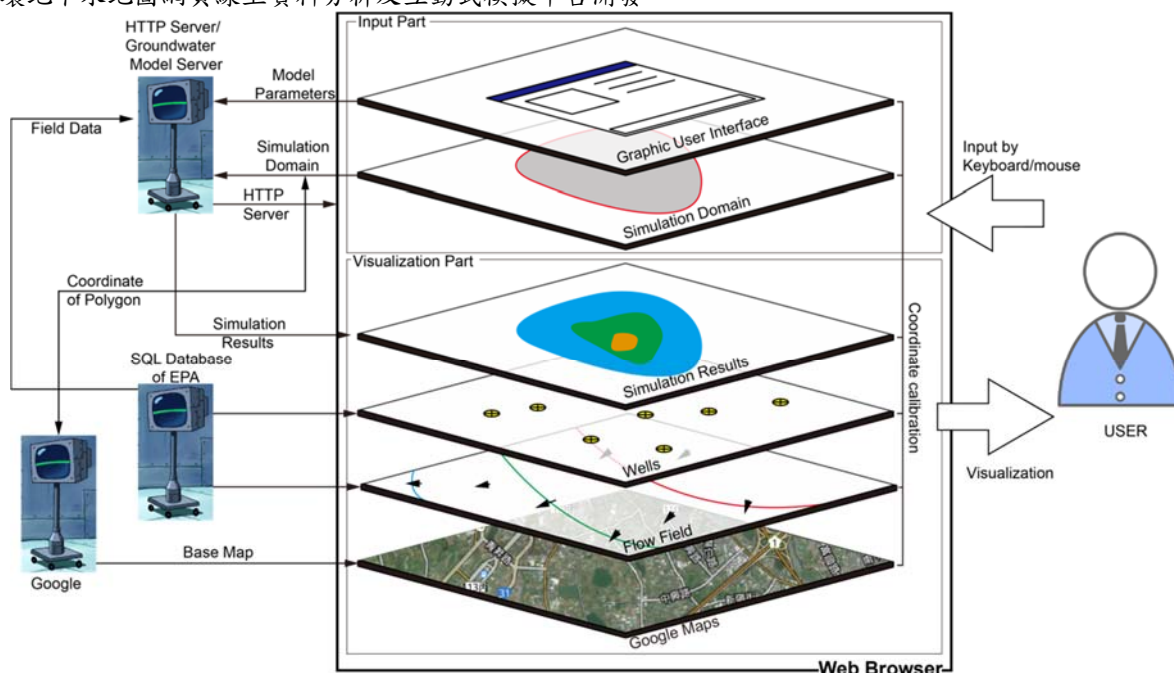


圖 3 平台內各功能之圖層與使用者關係。

使用者透過 Google Map Visualization Platform 的圖形化使用者介面查詢與檢視目前最新的土壤地下水相關公開資料，為了實現此一目標，本計畫使用之相關技術如下：

(1) GIS Database Server：

在電子三維資料儲存資料庫的選擇方面，本計畫採用微軟關聯式資料庫(MS SQL)，它具有全新的 OLTP 記憶體運算技術引擎，提高可靠的關鍵任務應用程式效能，平均可將交易效能提升 10 倍，查詢速度更可高達傳統解決方案的 100 倍。

(2) Google Map Visualization Platform：

使用者透過平台的 Google Map 視覺化使用者介面查詢與檢視地下水資料庫中之 GIS 資料。考慮近年來行動裝置蓬勃發展，且為了實現跨系統之目標，本計畫選定以網頁當作視覺化呈現介面。在系統整合與網頁視覺化的技術選擇上，我們採用 Apache HTTP 伺服器+ PHP + JavaScript + Bootstrap + Google Maps JavaScript API 作為系統整合與視覺化平台的框架與工具。

(3) Apache HTTP：

PHP 是一個應用範圍很廣的語言，特別是在網路程式開發方面。透過執行 PHP 的程式碼來跟後端 HTTP 伺服器溝通產生網頁資料提供給前端瀏覽器讀取。

(4) JavaScript：

主要目的是讓一般的 HTML 的網頁能夠成為動態網頁，藉此強化與客戶端間的互動功能，而且支援各種瀏覽器。

(5) Bootstrap：

簡潔，直覺，強大的行動設備優先前端框架，讓網頁開發更快速更簡單，且支援響應式網頁。

(6) Google Maps JavaScript API：

使用 Google Map API 抓取圖資、wgs84 經緯度位置，並將結果在 Google Map 上呈現。

4.2 應用資料數據蒐集與開拓

本計劃其中進度包括所執行之資料展示與數值模擬乃建立於既有單位如環保署 SGM、水利署、地調所等之資料庫數據，並輔以科學角度及學術理論所建立之數值模式進行資料點差分視覺化。相關之資料庫數據如為 MySQL、SQL Server、MS Access 等 DBMS 可開啟之形態皆無相容性之困難，而非上述 DBMS 可開啟之資料，本執行團隊亦會為其進行解碼及數位化編入平台資料庫，以下簡述本平台所蒐集之資料與其形態：

(1) 環保署 SGM 資訊系統：

SGM 系統涵蓋大量土水環境資料，內容包括地下水位、水質、水力傳導係數、水井資料、土壤品質、列管污染源等等。資料內容已納入 DBMS 系統，可直接與本平台建立資料庫橋接，不須經過系統轉換處理。

(2) 水利署地理資訊倉儲中心：

擁有全國最豐富且最新之水利地理資料與網路地圖服務，提供多元化供應管道及 GIS API 功能模組，內容包括各項水資源之 GIS 與 GML 資料。GIS 資料以 *.shp 型態為主，內容包括資料本體點線面圖資可供平台背景資料庫資訊使用，而本執行端亦會將 *.shp 二進位資訊轉譯解碼納入 DBMS 系統；GML 資料以開放之格式描述具有時間、空間及主題屬性之各類地理現象，本平台可直接嫁接於 GUI 使用者介面上，以提升在使用者端之互操作性。

(3) 地質調查所水文地質資料庫：

水文地質資料庫具有全台 11 地下水區之鑽井資料，包括井位資訊及井柱資訊，可提供平台資料展示及計算引擎調配水力參數使用。

4.3 規劃使用者介面、GIS 圖層資料庫、模擬參數與模擬範圍

本研究在設計使用者介面時，考慮此平台需要使用者劃定關注模擬範圍，並且經由介面設定相關模擬參數設定。因此本計畫預期結合 JavaScript 與 Google Map Visualization Platform 進行網頁視窗介面之開發，讓使用者能夠透過滑鼠操作介面功能設定。在此也需要同時連結 Microsoft SQL 內的資料庫，資料庫內容包含水井資料與

地層資料，資料來源主要為環保署土壤地下水管理資訊系統，輔以水利署等相關政府單位。資料庫將數值傳遞給使用者介面後，使用者將可以利用圖層概念，選擇性地展示各參數的空間分佈，並且決定各圖層的上下關聯，其相關性繪如圖 2。

地下水水井捕集區以及污染傳輸溯源追蹤數值模式皆以 Fortran 程式語法編譯，所有演算法皆建立於地下水流控制方程式、移流延散控制方程式、序率譜方法近似解控制方程式等相關學理架構。使用者設定模擬範圍與所需參數後，模擬平台將使用者所設定模擬範圍參數與範圍作為模擬前處理的網格離散化，其中包括空間網格建立、參數空間插值、挑除不正常參數資料等工作。此步驟最後則是將網格離散化的數值設定，傳遞至序率捕集區及溯源追蹤模式，以計算各別地下水井之捕集區及溯源環域分布與大小。

本計畫主要目的之一，即是將捕集區與溯源環域之模擬結果透過使用者介面，並將各圖層以圖形化方式展示。使用者將可利用普通可上網之瀏覽器或是行動裝置連結至平台並進行操作，平台上除可藉由地圖功能對資料庫物件之空間分布進行資料展示外，另外使用者並可藉由點選地圖上之物件，以檢閱資料庫內更詳記之物件屬性。為了能讓使用者對於介面使用能更容易上手，本計畫於期中階段已完成使用者介面之前期設計，以及地下水流場和質點追蹤之初步模擬。

表 5 工作執行甘特圖

工作項目 \ 106 年月		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
持續蒐集地下環境相關參數資料		✓	✓	✓				✓	✓	✓		
建置環境參數資料庫				✓	✓	✓	✓	✓	✓			
土壤及地下水資訊展示平台開發、測試		✓	✓	✓	✓	✓	✓					
線上空間資料分析平台開發與測試		✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
線上地下水水流模擬平台開發與測試				✓	✓	✓	✓	✓	✓			
污染傳輸模擬平台開發與測試							✓	✓	✓	✓	✓	✓
報告撰寫					✓	✓	✓			✓	✓	✓
成果彙整投稿期刊						✓	✓			✓	✓	✓
工作進度估計百分比(累積數)		5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
預定查核點	期中	完成蒐集地下水相關參數並建置線上資料庫、資訊展示平台、線上模擬平台參數設定、完成期中成果報告。										
	期末	完成線上 MODFLOW 之地下水水流與傳輸模擬平台、彙整研究成果投稿國際期刊、完成期末成果報告。										
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。												

(五) 結果與討論

5.1 使用者帳號管理

本研究平台設計可以讓使用者查詢既有空間與時間資訊、使用時空資訊設定地下水流場與傳輸模擬參數、執行數值模擬與各階段模擬成果展示。因此本研究開發能提供資料提供者設定控管使用者帳號權限功能，也就是每個資料庫以及其各欄位，並且包含模式操作功能皆可控制權限。為完成此功能，首先必須設定每為操作者的帳號，因此在本期已完成使用者帳號與密碼操作介面，如圖 4。

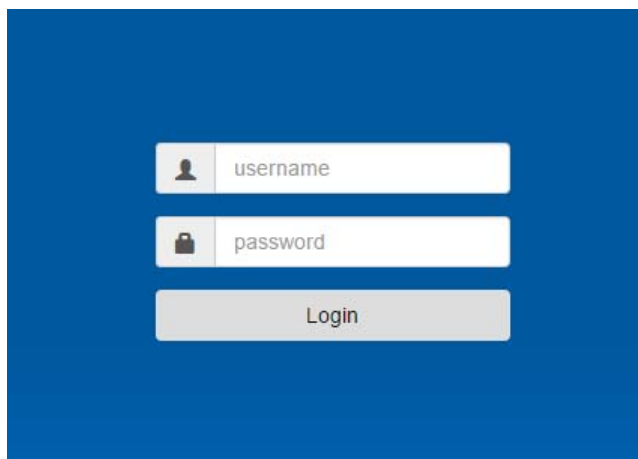


圖 4 本研究使用者登入帳號與密碼操作介面。

5.2 地理資訊平台

為達到能夠迅速完成展示空間資料，無論是經由儀器調查資料、政府開放資料(點、線、面資料)，或是使用者經由操作平台產生模擬結果圖層，都必須能夠流暢呈現，依據使用者目標展示合適尺度圖資套疊，並且需要克服瀏覽器展示巨量資料完整、可任意縮放與移動的特性。目前已有許多網路展示平台，大多以呈現空間點、線、面資料。

點資料(水利署地下水觀測井或戶政單位)，如圖 5 與圖 6 分別為我國 TGOS 戶政單位空間圖資在不同尺度下的呈現方式。在圖 5 較大尺度的地圖上，TGOS 將鄰近空間點匯集，節省瀏覽器記憶體耗費，而在圖 6 較小尺度的地圖，則可以將每個戶政單位皆呈現，主要原因在於小尺度內的資料個數較小，才不會造成瀏覽器耗費太多電腦計算資源，而導致使用者無法正常超作、移動與縮小放大地圖畫面，或有可使得瀏覽器強制關閉現象發生。

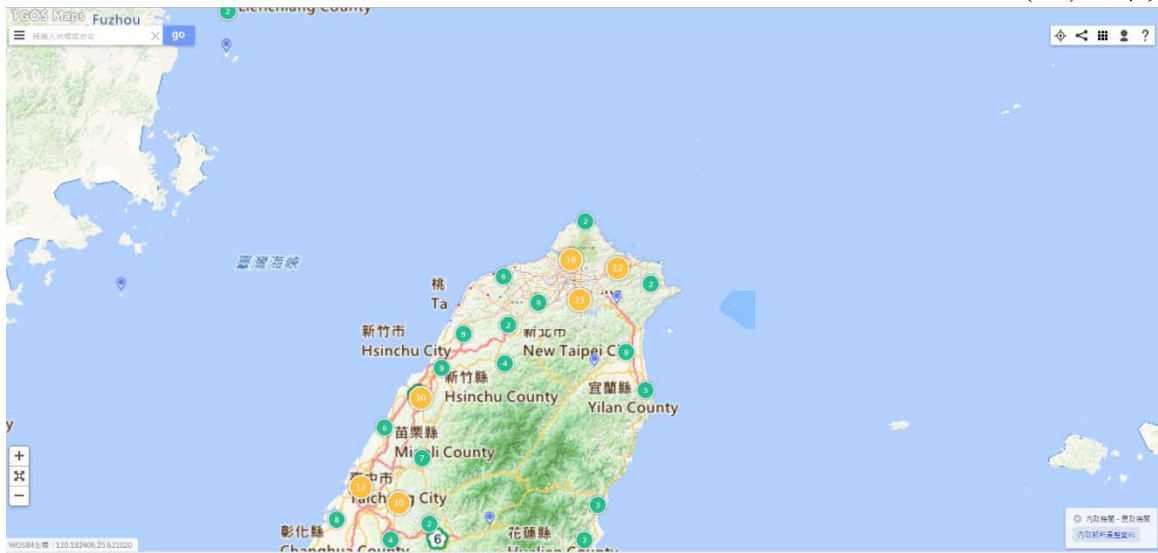


圖 5 TGOS 大尺度點資料(戶政資料)。(資料來源：<https://map.tgos.tw/>)

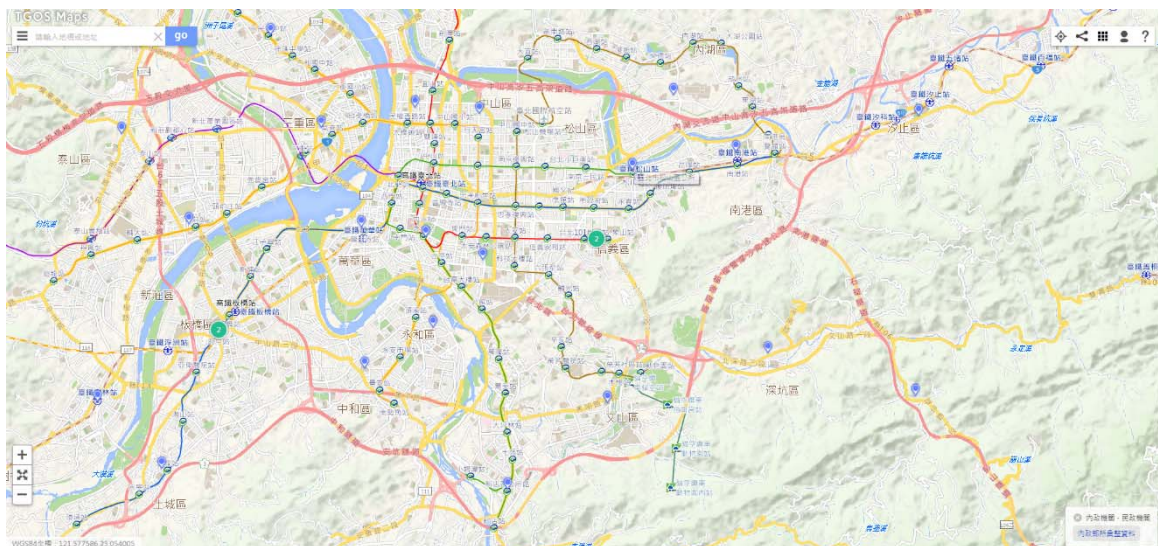


圖 6 TGOS 小尺度點資料(戶政資料)。(資料來源：<https://map.tgos.tw/>)

本研究目前採用 WebGL 技術，可以讓瀏覽器快速呈現空間資料，如圖 7 與圖 8 分別為不同尺度，現存地下水觀測井空間位置分佈圖。這些資料皆屬於點資料，由於在資料庫建置時，可以儲存每個資料的其他參數與屬性，因此本研究可以使用滑鼠在資料點上查閱細部資料，如圖 9。由於本研究所取得資料庫內個欄位皆有預設名稱，在此並未修改資料庫名稱，因此在圖 9 可以看到各屬性內的文字即為此資料細部資料重要欄位。本研究可以在管理者介面中，依據管理者設定欄位名稱以及開放或關閉欄位，藉由使用者權限等級，開放合適資訊。

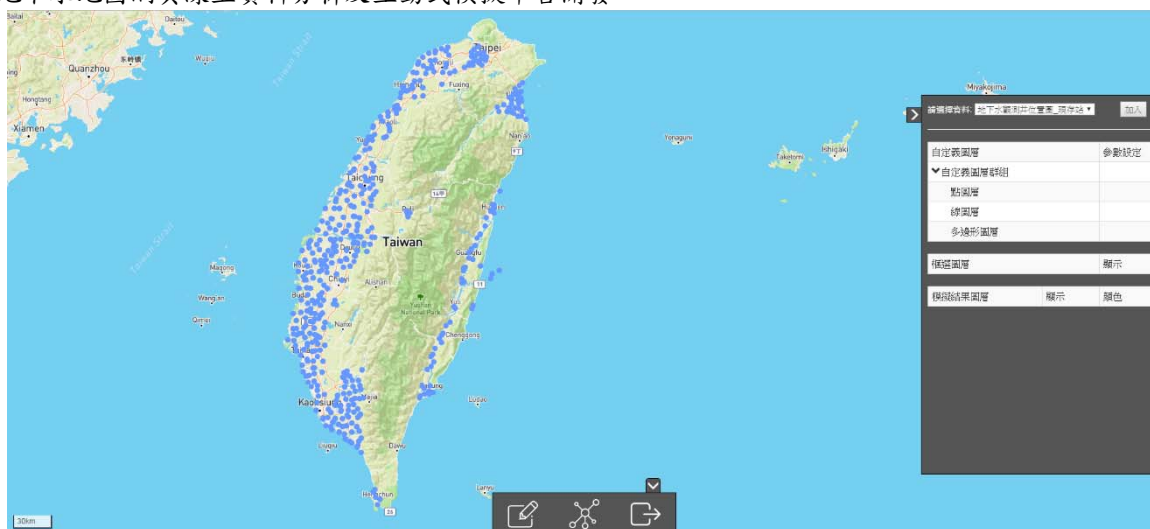


圖 7 本平台大尺度地下水觀測井位置圖(現存站)。

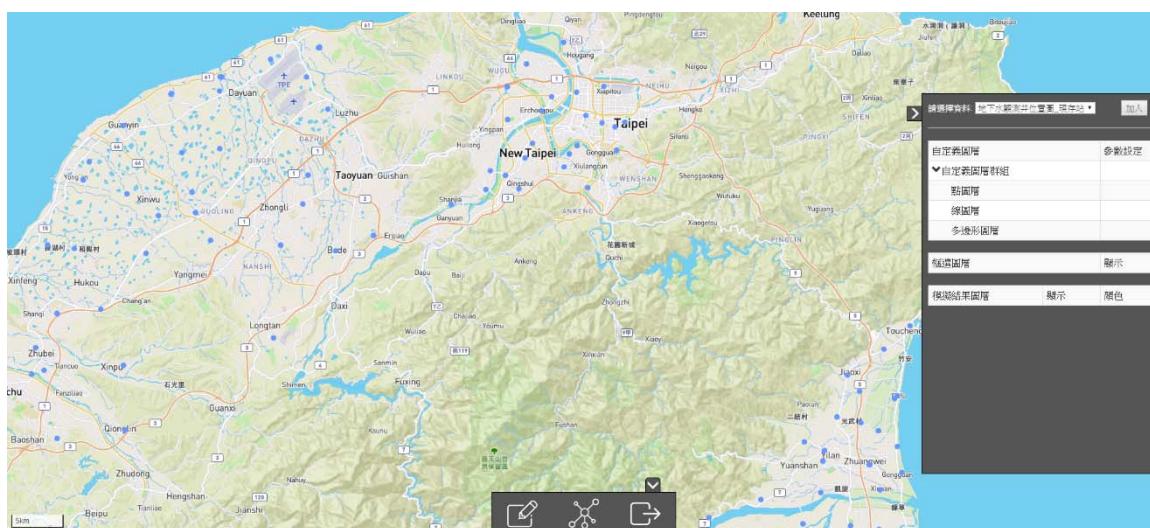


圖 8 本平台小尺度地下水觀測井位置圖(現存站)。



屬性	數值
deptid	10
layer	2
r_well	0
well	大橋國小
Oele	0
fin_date	20041231
TM_X97	301667.144029
welltype	2
TM_Y97	2773001.318701
StaticLe	0
wr_di_name	北區
PumpLe	0
coun_id	63000
dat_establ	20041231
elev_cur	3.647
town_id	6300600
well_num	0
ud_type	6
status	現存
HistogramN	0
well_mat	0
d_well	0
base_ele	3.699
address	台北市大同區重慶北路3段2號(大橋國小)

圖 9 單一地下水觀測井細部資料屬性。

目前本平台已完成不同單位全台點資料同時呈現，在於上述觀測井資料屬於單點資料，這些資料可能在於建置時或日後維護時所建置，並非持續記錄時序型資料，但是在於地球科學領域，有許多資料皆需要有空間與時序資料並存的資料。因此在於圖 10 則可以同時呈現點資料與該點之時序資料。目前在圖 10 中，則另外呈現水利署地下水觀測井與雨量站資料。

圖 11 與圖 12 是圖 10 中，單一地下水觀測井與雨量站時序資料。本平台可以自動判斷時序資料的時間與觀測值值域，完成合適時序圖展示。例如圖 11 為地下水水位，在此本研究以完成經由每小時資料計算日、月與年資料，使用者可以依據成果展示需求，選擇時、日、月與年資料呈現。如圖 13 則是僅呈現此地下水觀測井月與年水位資料，因此可以發現在水位縱軸值域隨著月與年水位資料而改變。

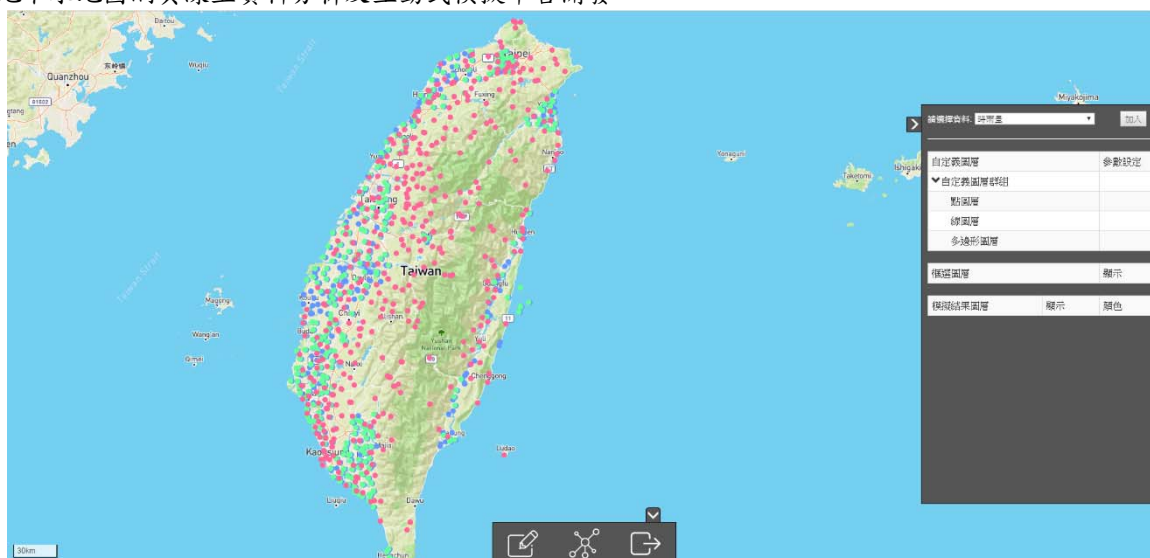


圖 10 不同單位點資料同時呈現。



圖 11 地下水水位時序資料。

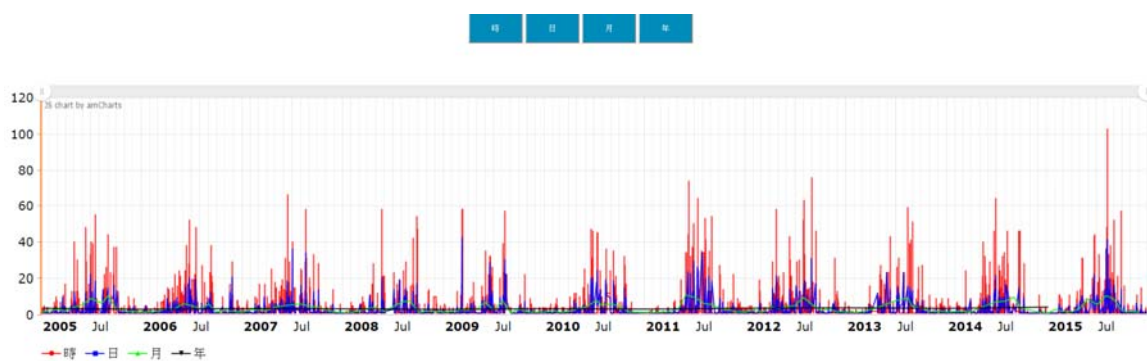


圖 12 雨量站時序資料。



圖 13 地下水水位時序資料(月與年資料)。

圖 14 所呈現的圖資屬於線與面的空間資料，包含國道附屬道路與人行道路網，此資料透過交通網路地理資訊倉儲系統查詢。依據圖資名稱，皆為道路圖資，但是這兩種圖資卻是不同資料型態。經由圖 15 較小尺度可以明顯看到在人行道路網屬於面的空間資料。基於以上理由，本研究必須將空間資料類型區分為點、線與面的資料型態。

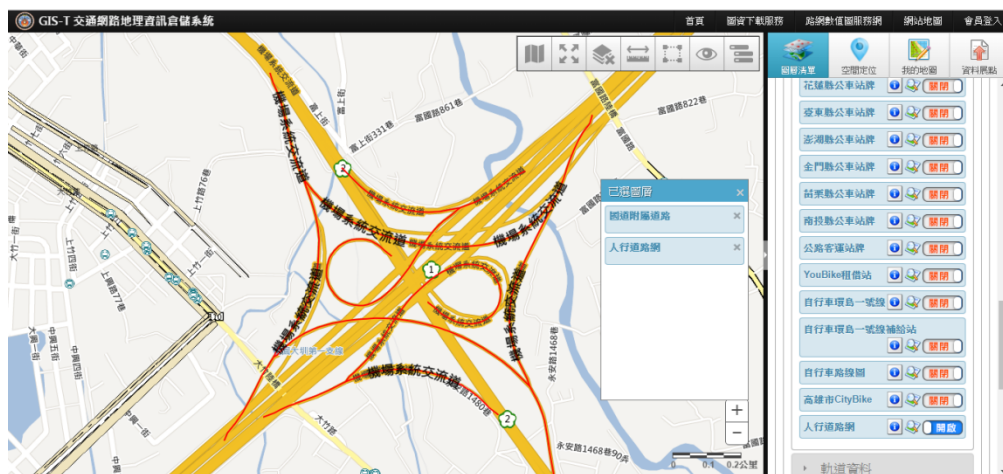


圖 14 交通網路地理資訊倉儲系統(大尺度)。

(資料來源：https://gist.motc.gov.tw/Gis_Platform)

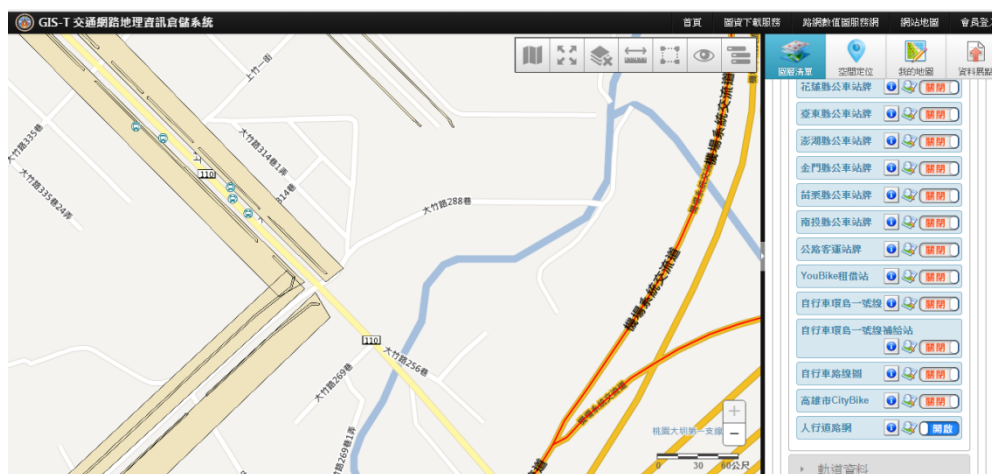


圖 15 交通網路地理資訊倉儲系統(小尺度)。

(資料來源：https://gist.motc.gov.tw/Gis_Platform)

土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發

另外也有其他屬於面的空間圖資，如圖 16 則是展是全球地質圖圖資，每一個地質分層皆使用多邊形並填色，圖 17 則是其中關於台灣地質圖圖資。

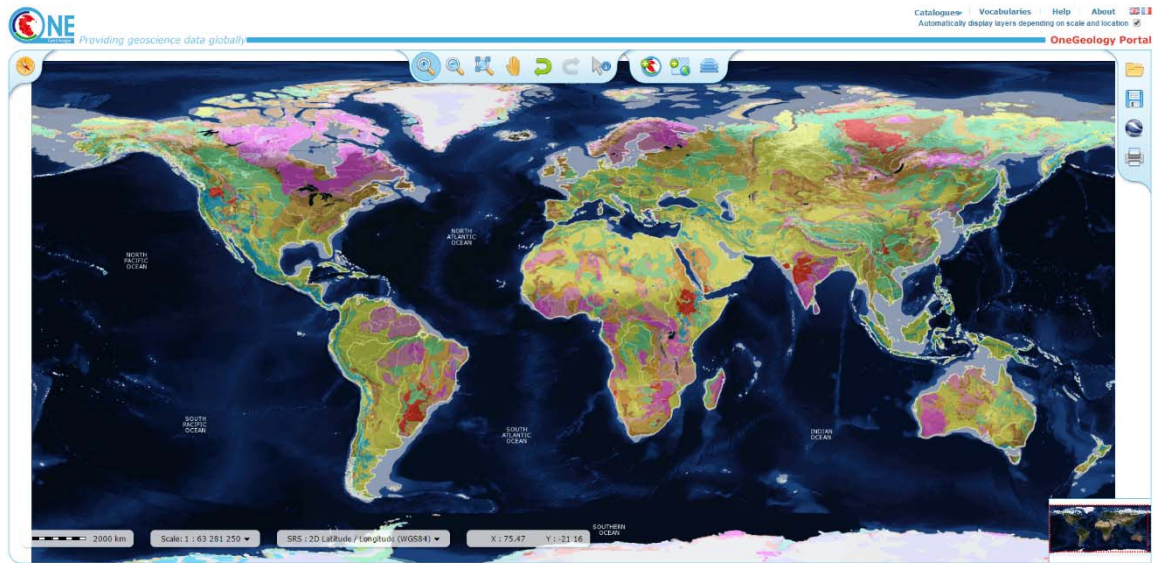


圖 16 OneGeology 全球地質圖資料圖資。

(資料來源：<http://www.onegeology.org/>)

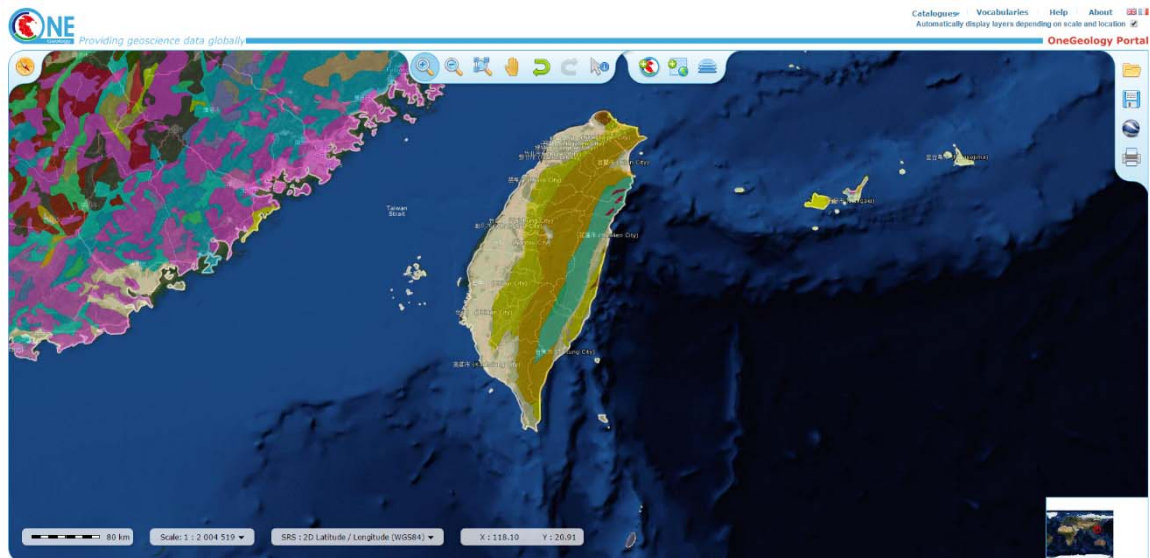


圖 17 OneGeology 台灣地質圖資料圖資。

(資料來源：<http://www.onegeology.org/>)

5.3 網頁前端地圖展示系統

本研究透過開放地理資訊系統 Mapbox 作為平台地圖展示基礎系統，主要原因在於地下水流場與溶質傳輸模擬所需參數以及空間資料個數，往往需要大數據資料處理，故本研究選擇具有支援 WebGL 功能。WebGL 主要功能在於提供使用者瀏覽器具有 OpenGL ES 2.0 的應用程序介面(Application Programming Interface, API)架構，不需要

其他外掛程式即可在 HTML 的環境展示三維空間圖形呈現。WebGL 程式包含常用 JavaScript 的程式控制碼，以及可以運用電腦顯示卡內圖形處理器(GPU)，藉由平行計算執行三維物件著色，WebGL 可以加入傳統 HTML 元素以及網頁控制功能。

Mapbox 提供詳細說明平台，讓開發人員能夠輕易找到既已且可使用的函式庫，於輕易而強大的 API 上控制與建構地理資訊圖資與其他應用程式。Mapbox GL JS 是一種 JavaScript 函式庫，提供使用者 WebGL 同時展示向量(Vector)與 Mapbox 自訂繪圖層。

為提昇資料處理適用性，本研究採用 GeoJSON 資料格式，此種資料格式屬於 Mapbox 可以接受的資料格式，並且為國際所公認合適儲存與傳輸資料格式，此種資料格式屬於向量圖層，我國政府資料開放平台資料集、內政部資料開放平台、地調所、水利署以及環保署皆提供相關 GeoJSON 檔案。GeoJSON 是一種專門適用於應用於地理資訊系統 (GIS)，屬於結構化的 JSON 標準格式。利用 GeoJSON 可以紀錄點 (Point)、折線 (Polyline) 與多邊形 (Polygon) 空間幾何結構，並且可以賦予每個資料特定特徵 (Feature) 的集合。

GeoJSON 點、線與多邊形資料，必定有資料類別 (type)，可以表示為 ("type": "Polygon")、("type": "LineString") 與 ("type": "Point")。以及座標 (coordinates)，紀錄經緯度座標。其他相關資料則存放在 (properties)。

經由平台後端伺服器計算，可以預先將既有資料集與使用者經由操作介面產生的各種圖層，皆產生相對應的 GeoJSON 檔案，最後在透過 Mapbox API 完成塗成展現。以下將詳述說明本研究使用 Mapbox 重要設定。

1. Mapbox 地圖呈現設定

本研究可以提供多種 Mapbox 地圖類別共計 9 種免費圖資，本研究為提供環境工程與地下水模擬人員使用，因此將預設圖資設定為可提供使用者查看地理高程的圖資。

(1) mapbox://styles/mapbox/streets-v10

此圖資可提供一般重要街道資訊，如圖 18。



圖 18 mapbox streets 版本 10 圖資

(2) mapbox://styles/mapbox/outdoors-v10

此圖資除了提供一般重要街道資訊以外，也提供使用者可以得知該地地形高層幾何形狀，如圖 19 與圖 20。



圖 19 Mapbox outdoors 版本 10 圖資

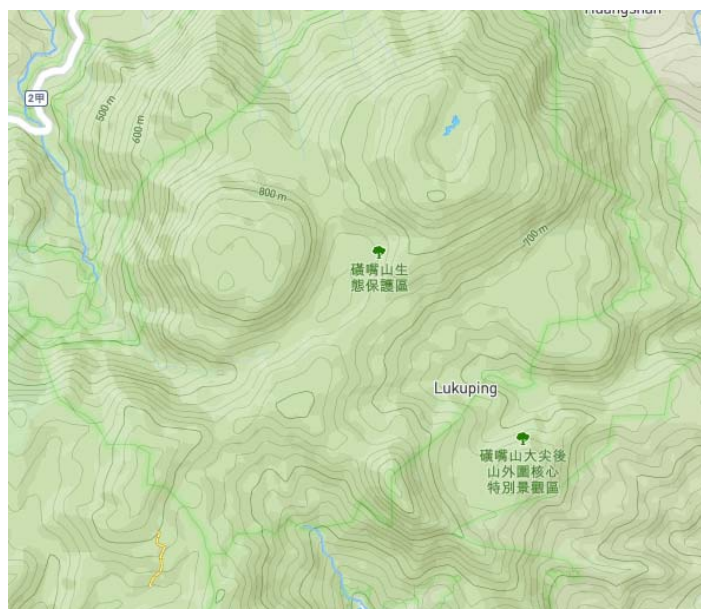


圖 20 地形等高線圖資(outdoors 圖資 V10)

(3) mapbox://styles/mapbox/light-v9

此圖僅提供使用者觀看較少資訊的白天街道地圖，如圖 21。



圖 22 Mapbox light 版本 9 圖資

(4) mapbox://styles/mapbox/dark-v9

此版本可以提供開發者使用於夜晚模式，當使用者開啟平台的時間為夜晚時，則可以更換此夜晚版本的圖資，此圖資並無法提供地質高程，但重要街道位置與名稱都可以呈現，如圖 23 與圖 24。



圖 25 Mapbox dark 版本 9 圖資(1)

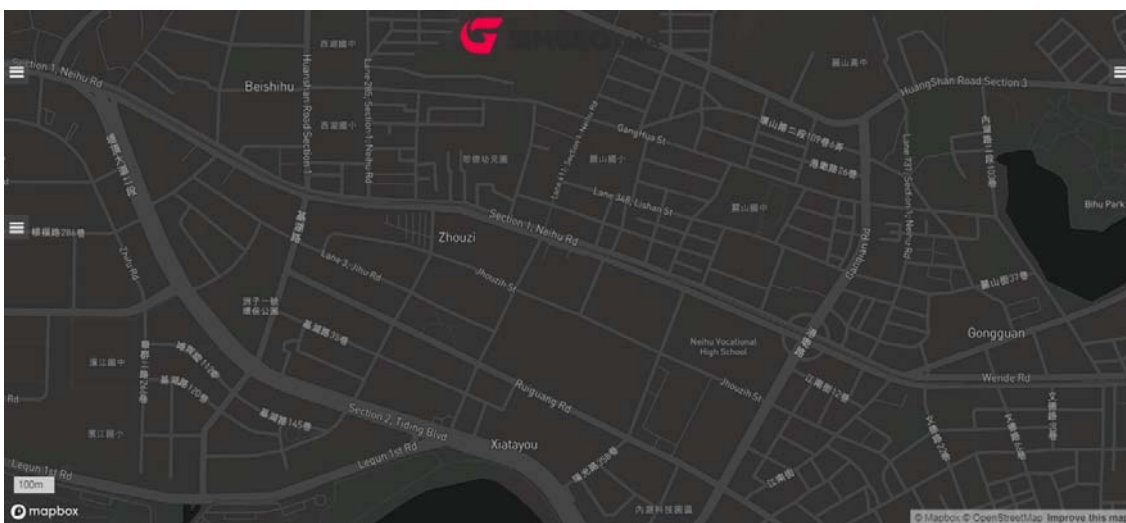


圖 26 Mapbox dark 版本 9 圖資(2)

(5) [mapbox://styles/mapbox/satellite-v9](https://mapbox.com/styles/mapbox/satellite-v9)

此圖資提供衛星影像與街道圖資，盡可能排除白雲等天氣現象，如圖 27。



圖 28 Mapbox satellite 版本 9 圖資

(5) mapbox://styles/mapbox/satellite-streets-v10

此圖資結合衛星影像以及街道圖資，如圖 25。至於街道圖資屬於低密度繪圖，並非每條街道線段與名稱都可以呈現，而且經由圖 30 可以發現，有些地名與道路名稱呈現方式不一致，中文與英文混雜表示。



圖 29 mapbox satellite-streets 版本 10 圖資(1)

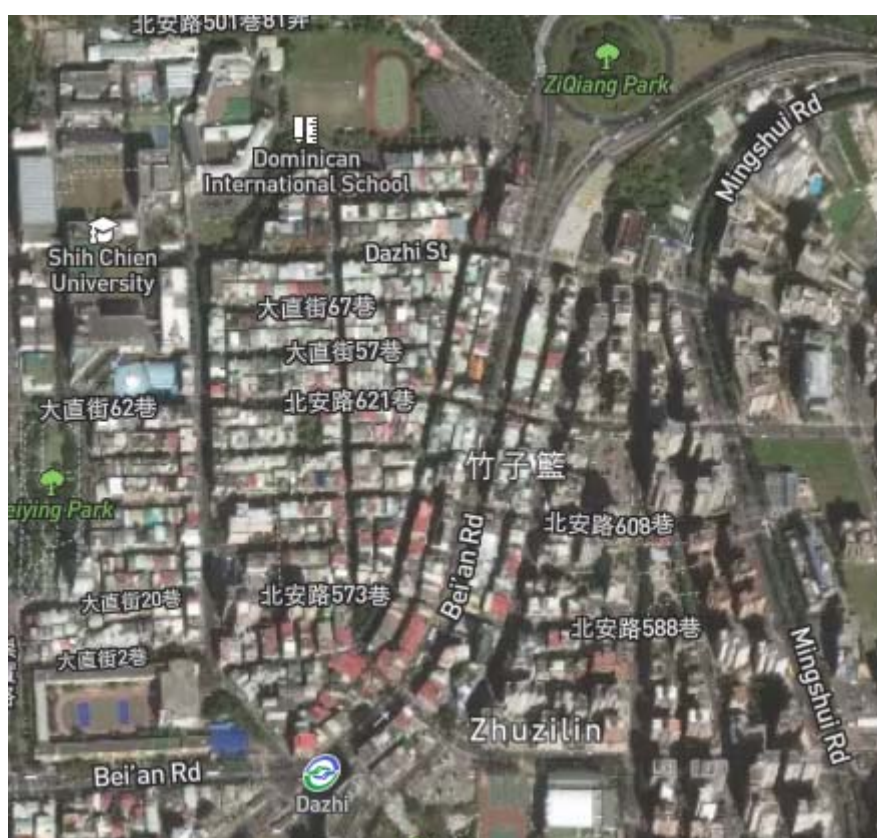


圖 30 mapbox satellite-streets 版本 10 圖資(2)

(6) mapbox://styles/mapbox/traffic-day-v2

此地圖的呈現主要在於將交通道路順暢程度利用顏色呈現，紅色代表極度壅塞、

土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發
橘色代表壅塞以及綠色表順暢，如圖 27 和圖 32。



圖 31 traffic-day 版本 2 圖資

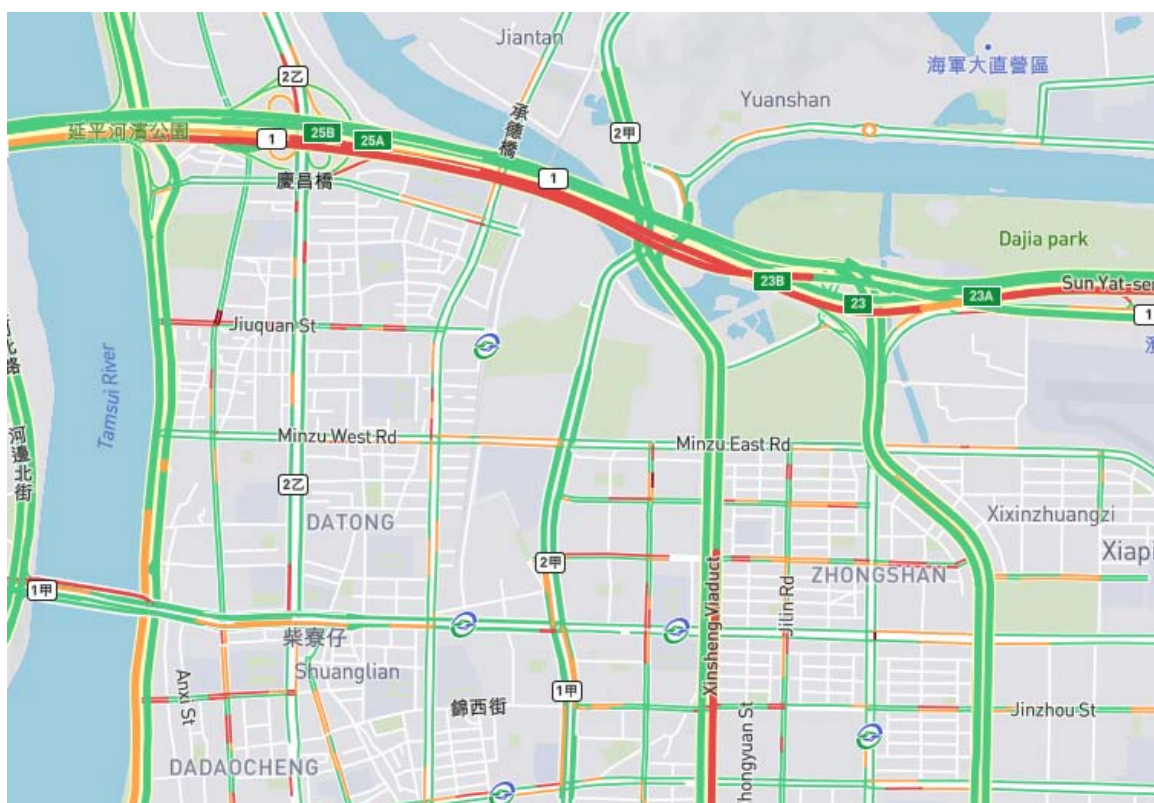


圖 32 交通順暢度圖資

(7) mapbox://styles/mapbox/traffic-day-v2

此地圖的呈現主要在於將交通道路順暢程度利用顏色呈現，紅色代表極度壅塞、橘色代表壅塞以及綠色表順暢，如圖 32。

(8) mapbox://styles/mapbox/traffic-night-v2

此圖層具備街道壅塞程度，但呈現夜晚模式，如圖 33。

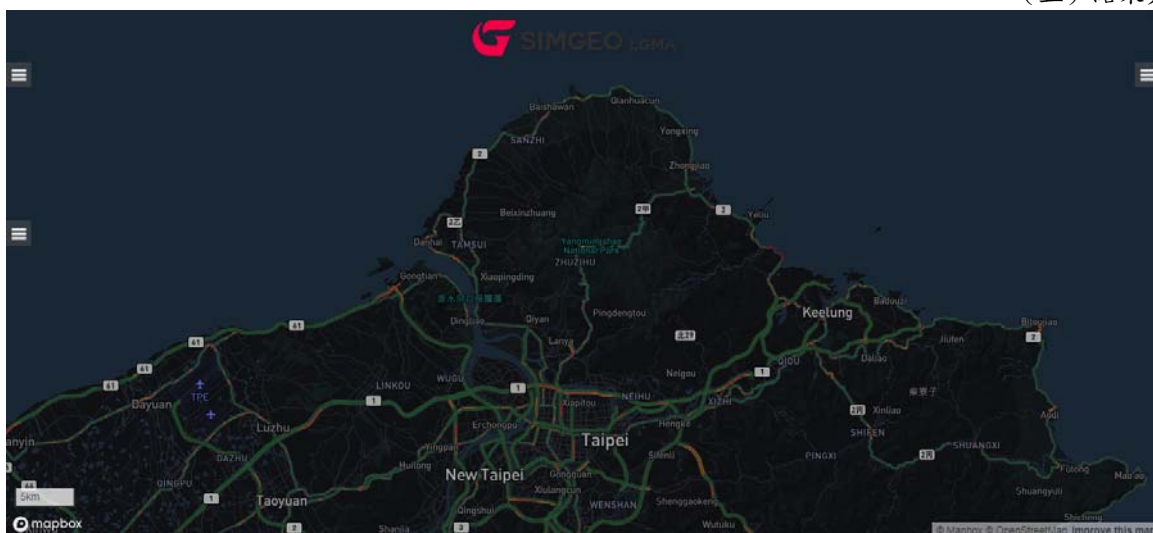


圖 33 traffic- night 版本 2 圖資

本研究可紀錄平時使用需求，其中包含地圖展示中心位置，在 Mapbox 設定中，可以自由依據經緯度座標，設定平台初始展示中心座標。圖 34 呈現為 2 種不同中心座標設定，上圖為台灣北部，下圖則為台灣南部。本研究設計具備關注使用者執行狀況，記錄較常使用需求，自動於下次使用者登入後，更改地圖預設展示中心座標。

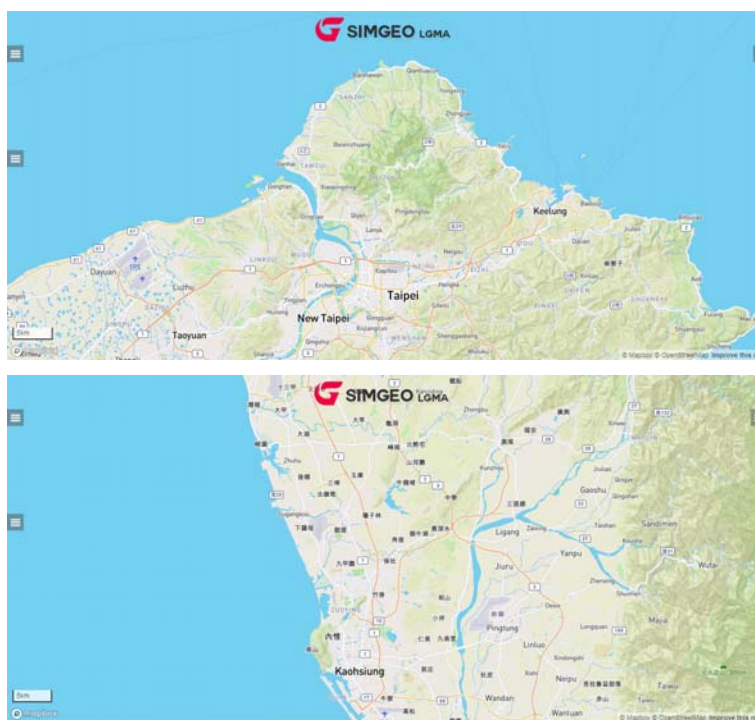


圖 34 不同初始地圖展示座標

目前無論任何網頁式地理圖資展示平台，皆可提供使用者利用滑鼠調整地圖縮小與放大功能。Mapbox 提供使用者縮放調整共 23 種，其比例尺的呈現為 1 m 至 3000 m。若可以在發現污染初期，則可以使用解析度較高的圖資，設定地下水數值模型，執行地下水流場與溶質傳輸模擬。

2. Mapbox 顏色設定

由於 Mapbox 可以利用管理者開放向量圖資，以及利用 Mapbox 自建繪圖功能建立的點線面圖層資料，展示於使用者瀏覽器。Mapbox 可提供開發者設定點、線與面特定繪畫方式，以及填色設定。填色的設定依據色碼表的參數，其顏色可區分為 R (紅色)、G (綠色) 以及 B (藍色) 共 3 大類別，每一類別依據深淺依據數值設定為 0 至 255，共區分為 256 等級。預設 0 為黑色，因此當 RGB 都是 0 時，則代表填色為黑色，色碼為 “#000000”，反之當 RGB 設定為最深的 255 時，則為白色 (“#FFFFFF”)，色碼表範例如圖 35。所計算出的色碼值，需經由 16 進位方式表示，並且強制利用 6 位數表示，其色碼計算式如下：

$$\text{Hex} = R \times 256^2 + G \times 256 + B \quad (1)$$



圖 35 色碼數值與顏色 RGB 關係

3. Mapbox 圖層繪圖工具型態設定

(1) fill (填滿)

此種適合於多邊形圖層的著色與呈現方式，其中包括以下功能：

fill-antialias (抗鋸齒狀)，此功能預設為開啟，程式表示為：[“fill-antialias”: true]。

fill-opacity (不透明度)，此功能預設值為 1，代表不透明，最小值為 0，則是完全透明，程式表示為：[“fill- opacity”: 1]。

fill-color (填滿顏色)，預設值為 #000000，代表黑色，若要改變顏色則需使用色碼表功能。圖 36 同時使用透明度與填滿顏色功能。

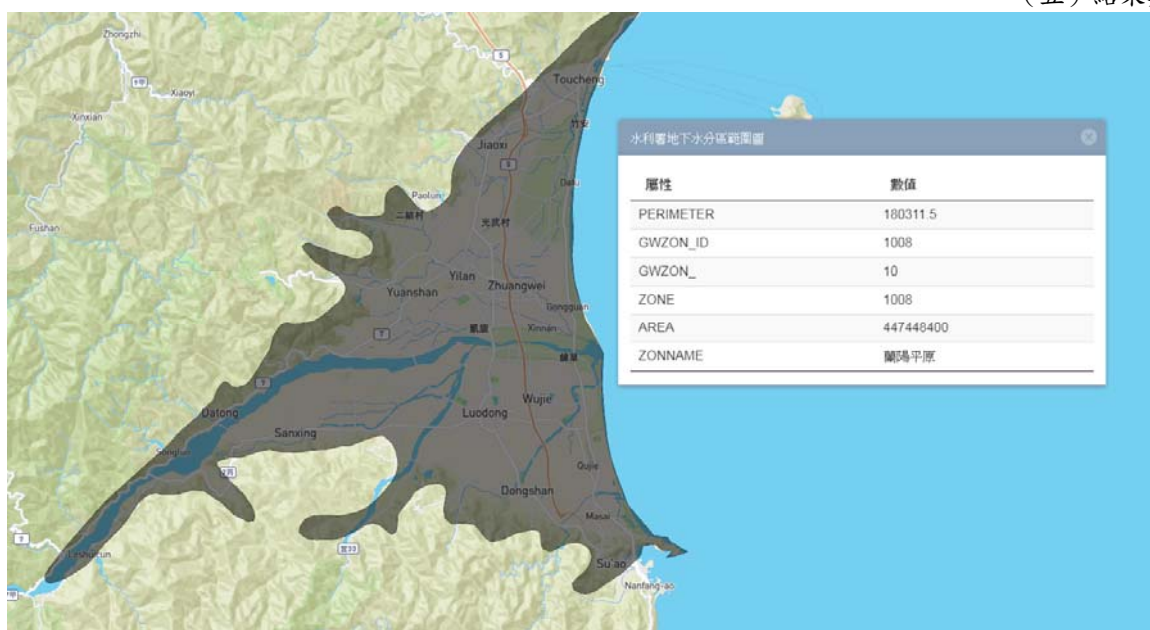


圖 36 蘭陽平原地下水分區，多邊形填色不透明度 0.5

fill-outline-color (邊框顏色)，此功能預設與填滿顏色相同，但是如果要改變邊框顏色，則 fill-antialias 功能也需開啟，如圖 37。



圖 37 面圖層填滿白色，而邊框設定為黑色，不透明度為 1

(2) line (線段)

此種繪圖工具適用於面與線資料圖層，Mapbox 提供以下功能：

line-opacity (線段不透明度)，預設值為 1，表示完全不透明，最小值為 0 代表完全透明。

line-color (線段顏色)，預設顏色為黑色(#000000)，填色方式採用色碼表的演算法。

line-width (線段寬度)，預設值為 1。最小值為 0，代表線段寬度為 0，完全無線段。

圖 38 表示線段寬度為 1 與 5 的表示差異。



圖 38 不同線段寬度，左右圖分別設定為 1 與 5

line-gap-width (線段內間隔寬度)，預設值為 0。此功能可以提供使用者將線段內部設定特定寬度為透明度，其效果如圖 39。

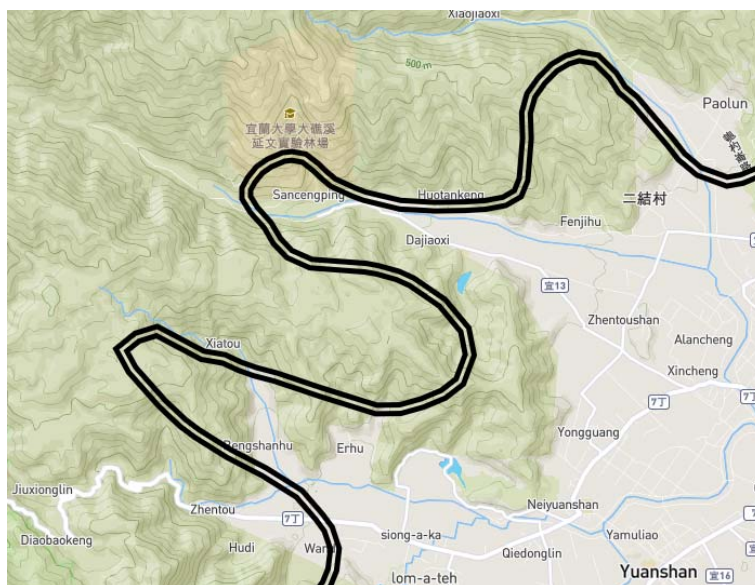


圖 39 線段寬度為 5，內部間隔寬度為 3

line-dasharray (虛線線段)，此功能可以展示虛線，需要設定 2 個數值，包含展示線段與透明線段長度。其效果如圖 40。

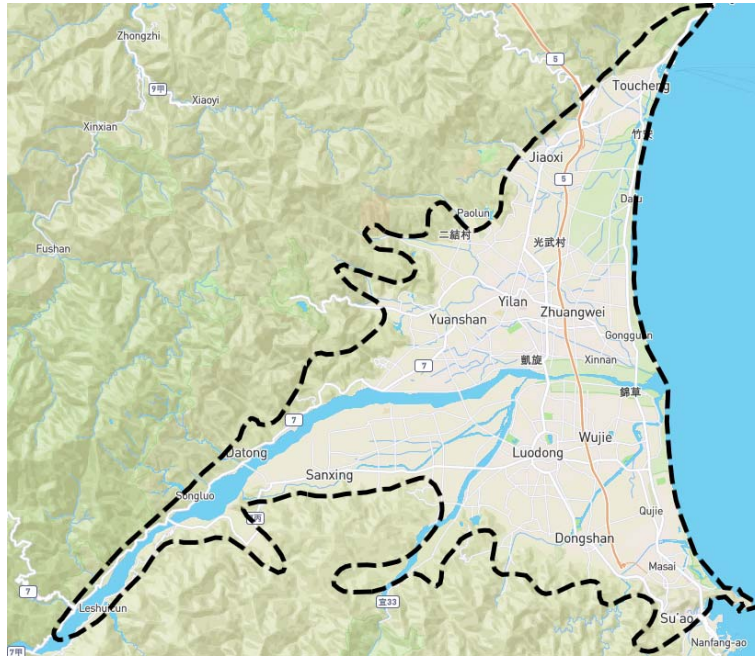


圖 40 虛線線段展示

(3) circle (圓點)

此種繪圖方式較適用於點圖層，但是也可以用於線與面圖層，其詳細功能說明如下：

circle-radius (圓點半徑)，預設值為 5，代表每個圓點半徑為 5 像素(pixels)，其數值可以設定為 0，則點資料則不會呈現。

circle-color (圓點顏色)，預設為黑色(#000000)，可以更改填色，填色演算法依據色碼表。

circle-opacity (圓點不透明度)，預設值為 1，代表完全不透明，最小值為 0，代表完全透明。

circle-stroke-width (圓點外框厚度)，預設值為 0，代表無外框。

circle-stroke-color (圓點外框顏色)，預設為黑色。

circle-stroke-opacity (圓點外框不透明度)，預設值為 1，代表完全不透明。

圖 41 為本研究測試圓點外框設定，在此設定圓點半徑為 7，外框半徑為 4，但是 Mapbox 的設定係指，外框的半徑 4 加上圓點半徑 7，因此實際外框半徑為 11，但半徑為 7 的位置則是圓點繪圖區域。

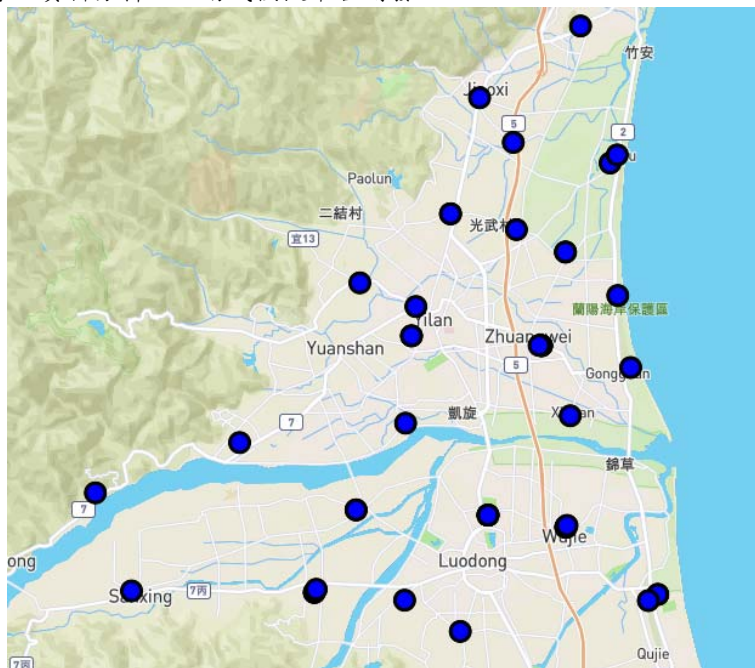


圖 41 圓點外框寬度與填色

(4) fill-extrusion (填滿抬高)

此種繪圖方式較適用於面圖層，可以同時將圖層填色，更可以藉由 3D 展示效果，突顯特定圖層，如圖 38。其詳細功能說明如下：

fill-extrusion-opacity (不透明度)，預設值為 1，代表完全不透明填色。

fill-extrusion-color (填滿顏色)，預設為黑色(#000000)，可以更改填色，填色演算法依據色碼表。

fill-extrusion-height (抬高程度)，預設最小值為 0，單位為公尺。

fill-extrusion-base (抬高基準高度)，預設值為 0，單位為公尺。

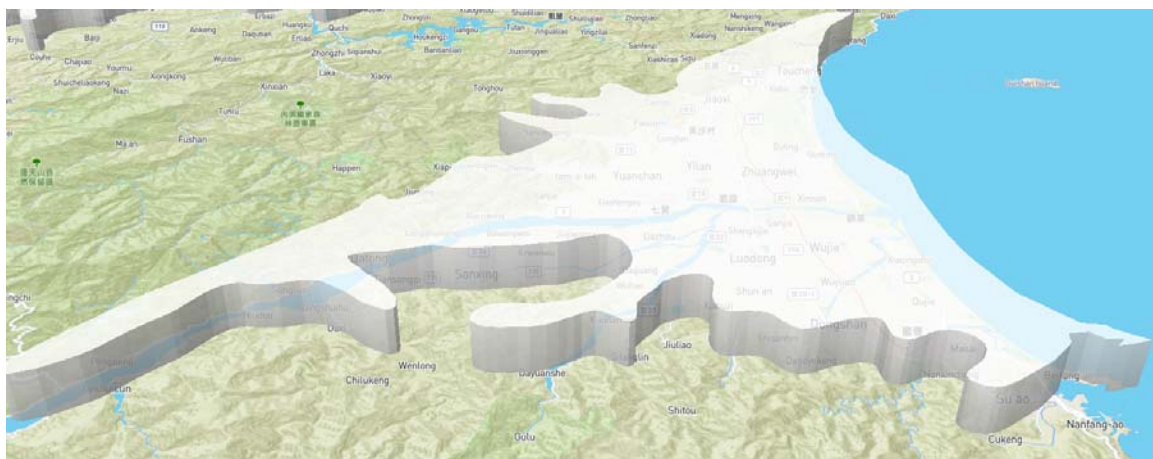


圖 42 面資料圖資填滿抬高

5.4 圖層管理系統

空間資料的呈現主要需要透過圖層的套疊，經由地圖座標系統使不同的圖層能夠完成同時展現。4.3 小節中以說明圖層的種類可區分為點、線與面三種圖層，但為提昇使用效能，本研究將圖層的種類再區分為自定義圖層、框選圖層與模擬結果圖層 3 種。圖 39 是本平台預設圖層管理介面，此圖表是使用者並未增加任何圖層。



圖 43 展示圖層分類。

在使用者進入平台後，平台正下方為本平台主要操作工具，可分為繪圖工具、科學模擬與登出，如圖 40。經由繪圖工具與科學模擬工具，皆會產生新增圖層，而新增圖層則會出現於展示圖層分類(圖 39)中。



圖 44 平台操作工具。

本研究設計 5 種繪畫工具，可提供使用者透過滑鼠與平板裝置新增與刪減圖層，此 5 種工具包含點圖層繪畫工具、線圖層繪畫工具、面圖層繪畫工具、框選圖層繪畫工具與刪除圖層工具，其圖示如圖 41-45。以下將針對每種繪圖工具進行詳述：



圖 45 點圖層繪畫工具。



圖 46 線圖層繪畫工具。



圖 47 面圖層繪畫工具。



圖 48 框選既有資料庫圖層繪畫工具。



圖 49 刪除圖層繪畫工具。

現地有著地下水井、露頭、採樣點或是氣象觀測站等，這些資料皆可設定微點圖層資料。在圖 46 中測試新增 2 個點圖層，預設滑鼠左鍵標示後呈現橘色，未被標示呈現藍色，而在右側圖層管理介面則可發現新增點-1 與點-2 圖層。

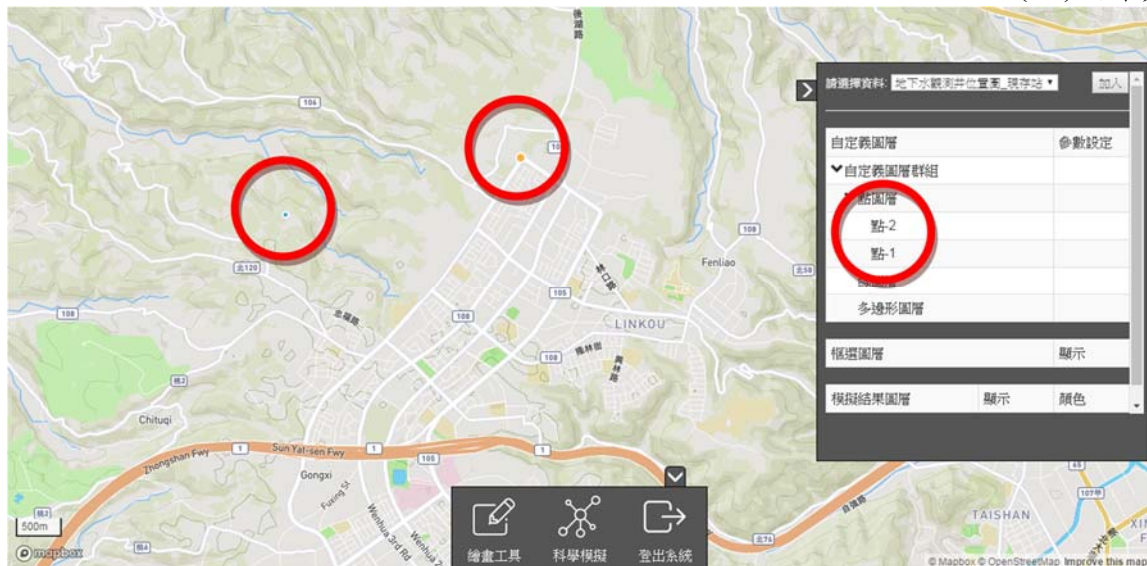


圖 50 新增 2 層點圖層

河川、山稜線或是海岸線，這些天然地理構造在概念模式，通常可能利用折線代表。圖 47 則是本研究測試新增 2 層折線圖層，如同點圖層，若利用滑鼠標是後會呈現橘色，反之則為藍色。本研究並無設定每條折線最大頂點個數，並且可以接受在構造較複雜區域加密，透過折線頂點表現地質構造。

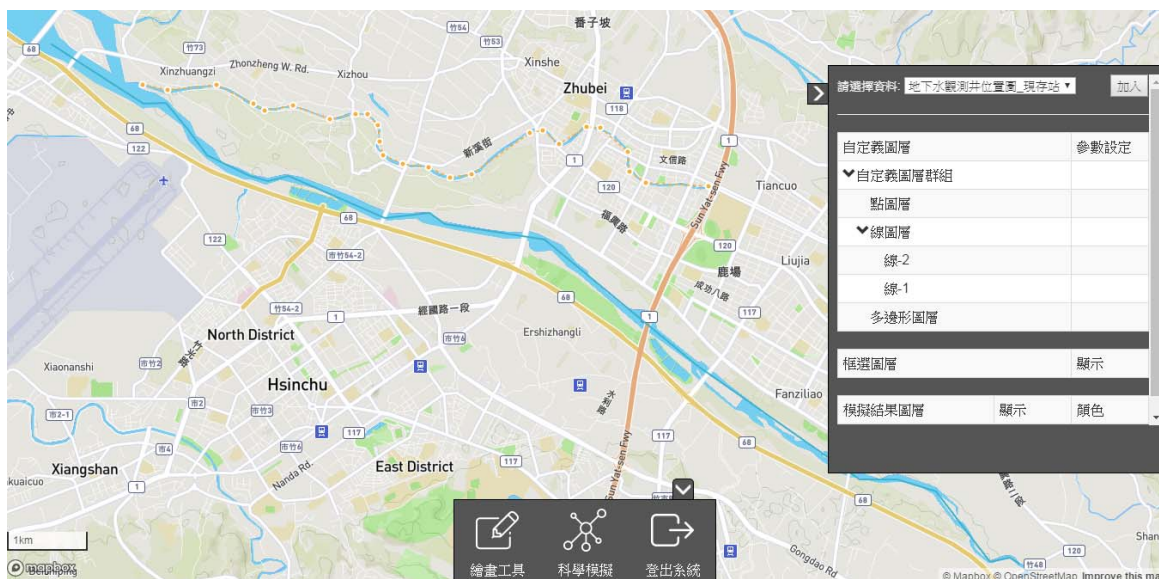


圖 51 新增 2 層線圖層。

為確定模擬範圍，必定要設定模擬範圍區域，在此我們通常設定多邊形區域作為模擬範圍，或是為劃分集水區、地下水分區、河道或是沖積扇等區域，皆會使用面的空間圖層表示。圖 48 新增兩層多邊形圖層。

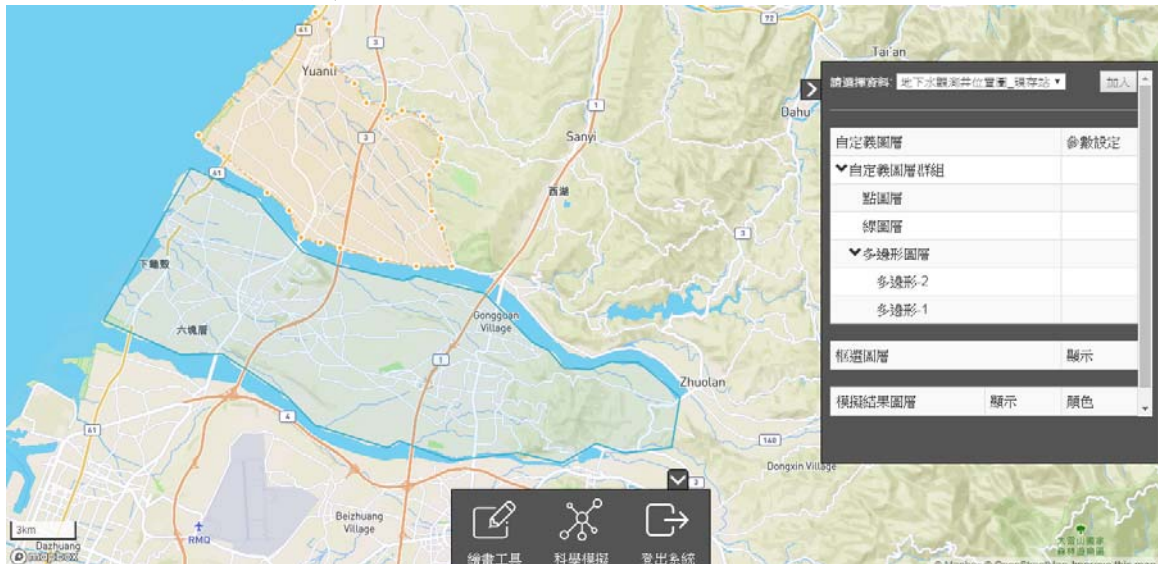


圖 52 新增 2 層面圖層。

執行地下水數值模式須經由水文地質空間資料作為參數設定，因此本研究在點、線與面圖層皆可設定不同參數，並且依據使用者權限開放或關閉設定各種參數。

無論是點、線或面圖層參數設定皆使用相同啟動介面，其啟動介面的操作如圖 49，滑鼠左鍵點選圖層名稱，即可出現參數設定啟動介面。

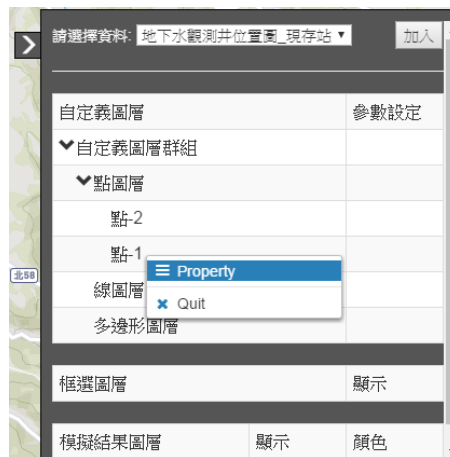


圖 53 點圖層參數設定啟動介面。

圖 50 為本模式設計點圖層參數為地下水井的設計，可以控制為觀測井、抽注水井，固定或不固定流率，固定或不固定濃度等設定。在此預設為每個點圖層皆為觀測井，並不會影響流場與溶質濃度。

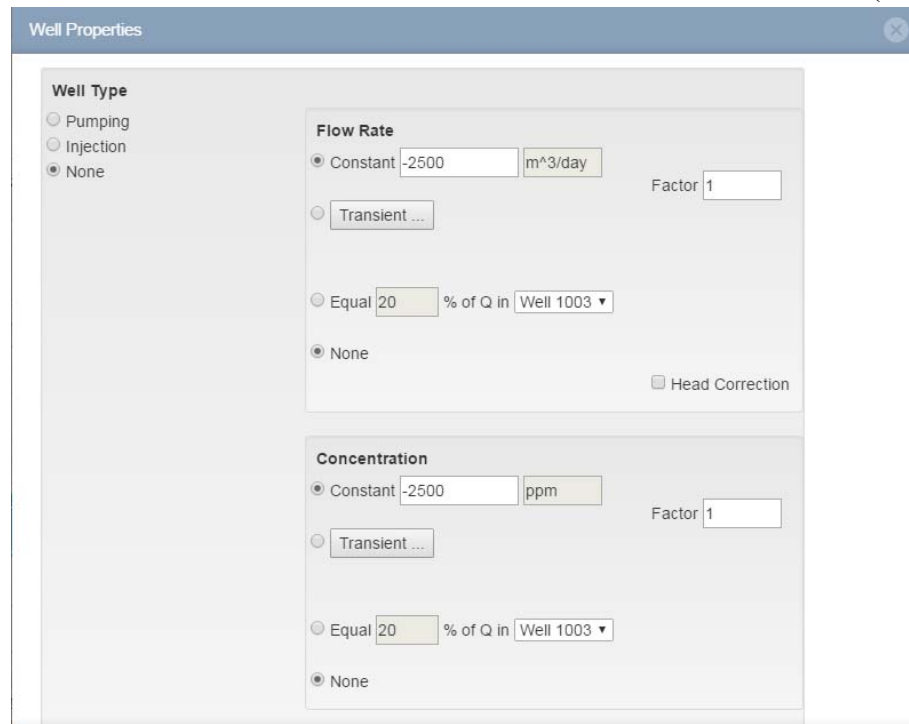


圖 54 點圖層參數設定啟動介面。

圖 51 為定水頭邊界條件、水頭與地表高層相同、變水頭設定或是 River 或 Drain 模組。



圖 55 線圖層參數設定介面。

設定地下水數值模式之前，必須先設定概念模式，其中不同含水層幾何位置、空間座標。因此本研究將考量未來使用性，擴展圖層未來程式銜接延展性，設計面圖層的較多參數，本研究將參數分為 3 種分類，可區分為 Physical Properties、Aquifer Elevation and Calibrations Data 與 Source and Sinks。

圖 52 表列出面圖層 Physical Properties 參數設定介面，使用者可以設定含水層眾多參數，例如水力傳導係數，並設定及其單位。本研究可設定水平與垂直異向性，每個參數皆設定合理預設值，這個部份可以設定使用者權限，限制使用者是否可以修改

土壤地下水地圖網頁線上資料分析及互動式模擬平台開發
每個參數。

Zone Properties

Physical Properties Aquifer Elevation and Calibrations Data Source and Sinks

☒ Conductivity 1 m/day

☐ Kx/Ky 1

☐ Kx/Kz

☐ Orientation of AnisF in XY degree

☐ Orientation of AnisF in XZ degree

☐ Retardation Factor

☐ Partitioning-Kd m³/g

First Order Decay

☐ Decay Coeff

☐ Half Life

☐ Soil Particle Density g/m³

☐ Specific Yield 0.0e0

☐ Specific Storage 0.0e0 1/m

☐ Effect Porosity 0.3

Molecular Diffusion

☐ D^xxx 0.0e0 m²/day

☐ D^xyy 0.0e0 m²/day

☐ D^xzz 0.0e0 m²/day

☐ Orient_XY 0.0e0 degree

☐ Orient_XZ 0.0e0

Local Dispersion

☐ Long. 1.0e0 m

☐ Trans. 1.0e0 m

☐ Vert. 0.0e0 m

圖 56 面圖層參數設定介面(Physical Properties)。

圖 53 則是設定含水層垂直方向幾何形狀與座標，包含含水層頂部高程、底部高層或含水層厚度。在圖中可以看到，本研究設計使用者如果設定底部高層時，則無法設定含水層厚度，由於這兩項設定屬於相依，因此必須透過介面操作時必須作此設定。也可以設定校正參數，包含總水頭、溶質濃度與水力傳導係數。若設定地下水模式為暫態時，則在此必須使用設定含水層初始總水頭。

Zone Properties

Physical Properties | **Aquifer Elevation and Calibrations Data** | **Source and Sinks**

Aquifer Elevation

☐ Top Elevation -10 m

☐ Bot Elev/Thickness

☒ Bottom Elevation -50 m

☐ Thickness 40 m

Attribute Elevations

☐ Z-Upper -10 m

☐ Z-Lower -50 m

Calibration Data

☐ Head 0.0e0 m

☐ Concentration 0.0e0 ppm

☐ Conductivity 0.0e0 m/day

☐ Starting Head -10 m

Turn Starting Head to Prescribed Head

Turn Prescribed Head to Starting Head

圖 57 面圖層參數設定介面(Aquifer Elevation and Calibrations Data)。

本研究設計可以使用面圖層作為源匯項設定，因此在 Source and Sinks 參數設定如圖 54。可以設定抽注水與溶質，並且設定固定流率或是不固定流率。對於溶質可以設定瞬間或持續增加溶質，若是持續增加溶質也可以設定不固定質量注入。或是設定為河流的型態，設定為定水頭或變水頭，以及固定質量或不固定質量注入。但若設定為河流型態時，則必須設定河流底部高程，在此也可以設定與地表高層相同。經由 Drain(排水)介面可以設定排水率，在此必須設定於模式中排水位置。經由 Prescribed Head 可以設定以含水層的單位，其中每個網格皆設定定水頭邊界條件，其數值可固定為某一數值，或與初始水頭相同。

圖 58 面圖層參數設定介面(Physical Properties)。

5.5 空間插值

無論地下水井觀測網如何建置，仍不可能達到無止境的精細；或是污染物追蹤使用極高密度採樣或設置觀測井，若污染物因地下水流場移動，則會造成更無法掌控情勢發生。因此憑借人類有限的能力，藉由蒐集空間與時間資訊，推估該關鍵數值的時空分佈，其關鍵數值包括地下水流場或污染物濃度等。

目前本研究以初步完成 Inverse Distance 的插值方法，使用者可以依據需求，設定目標插值的網格密度、關鍵參數與插值空間範圍，操作按鈕如圖 55。



圖 59 Inverse Distance 操作介面按鈕。

圖 56 為本研究測試 Inverse Distance 模式空間插值結果，此資料為地下水觀測網水井高程作為觀測數據，共計 23 口水井。使用者可以自行設定計算插值範圍網格間隔，本研究預設分割方式為等間距切個 51 個網格節點。

透過空間插值模組，可以應用於計算水力傳導係數、地表高層、初始水位分佈與污染物濃度分佈等資訊。故此模組則可以應用於針對每口監測井歷時濃度監測，分析當時污染物分佈，進而判斷不同污染物濃度分佈情形、地下水流向，並應用於推估未來設定地下水模式使用。

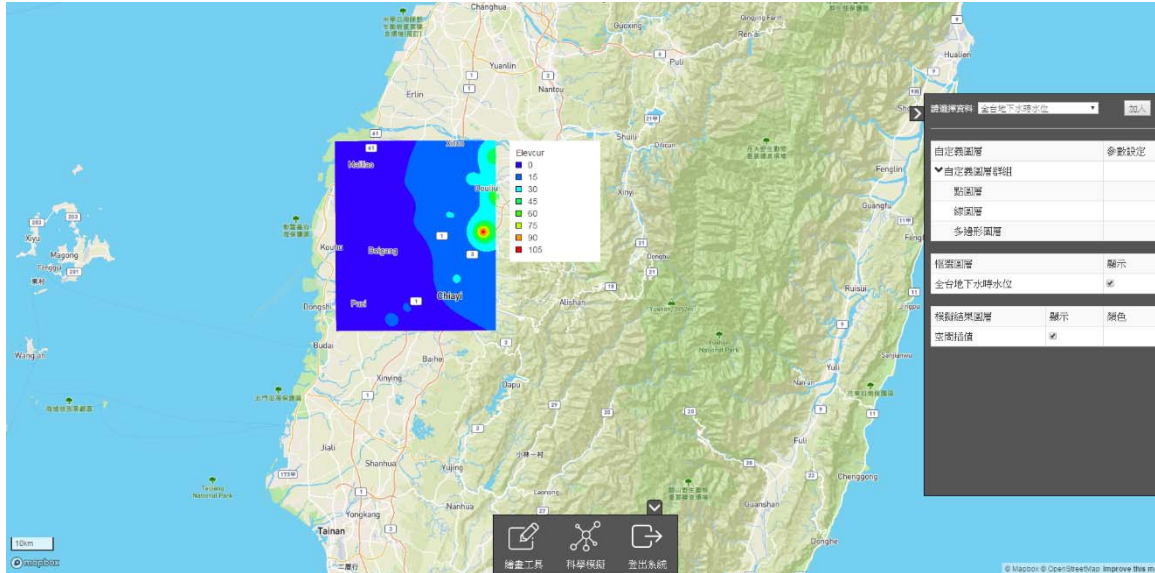


圖 60 地下水井地理高程空間插值(Inverse Distance)。

5.6 網格生成模式

為描述現實狀況的含水層範圍或是模擬區域，通常屬於不規則多邊形，並非使用簡易幾何圖形（正方形、圓形、長方形、梯形或三角形等），即可完成描述。因此本研究中藉由 Delaunay 三角化技術(Lee and Ni, 2015)，使用者可以設計任意多邊形，無論是否有交錯與重疊，皆可完成三角網格生成。

本研究首先透過多邊形繪圖工具，描繪出蘭陽平原幾何大致外型，建構好幾何外型後，則會於圖形管理介面新增一層面的圖層，如圖 57。建構此多邊形的面圖層之後，即可使用本平台所開發網格生成模組，操作按鈕如圖 58。

圖 59 則是執行網格生成模式後網格分佈結果，為清楚展示每個網格形狀，在此設定較疏鬆網格大小，其每個節點的點密度皆可開放使用者設定。本研究設定在執行網格生成後，模式會自動判斷面圖層的位置，在每個面圖層繪製其顏色，協助使用者判別多邊形圖層與網格相對位置，如此可辨別面圖層，協助設定多邊形面圖層參數。圖 60 則是在蘭陽平原內增設兩個多邊形，其 3 個多邊形面圖層共同作為網格生成模式初始設定條件，圖中可以看出三個多邊形外型以及每個三角網格資訊。

最後在執行網格生成後，使用者可以控制繪圖資訊，透過圖層管理介面(如圖 61)，可以設定僅有網格線段、多邊形面填色，以及網格與多邊形顏色皆展示或一同不展示。

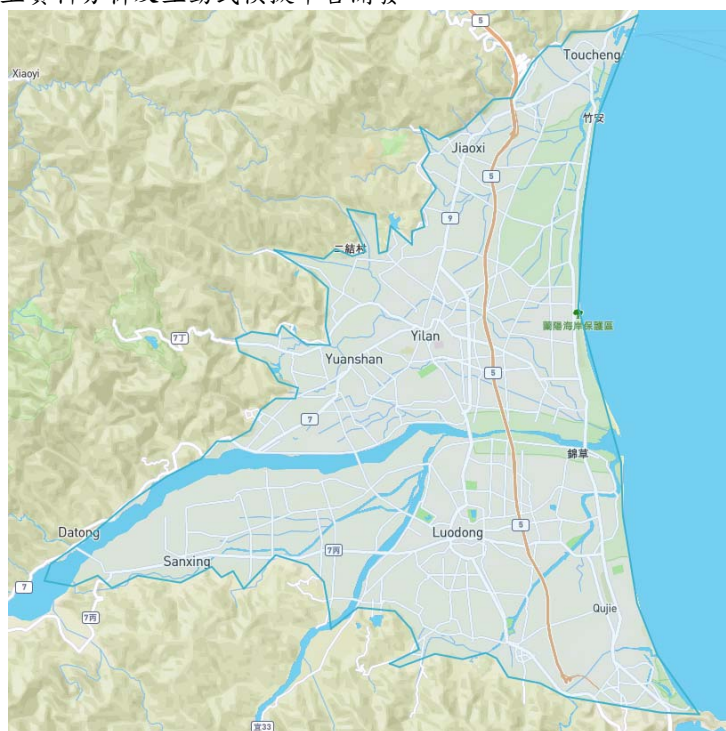


圖 61 蘭陽平原幾何外型圖層。



圖 62 網格生成操作按鈕。

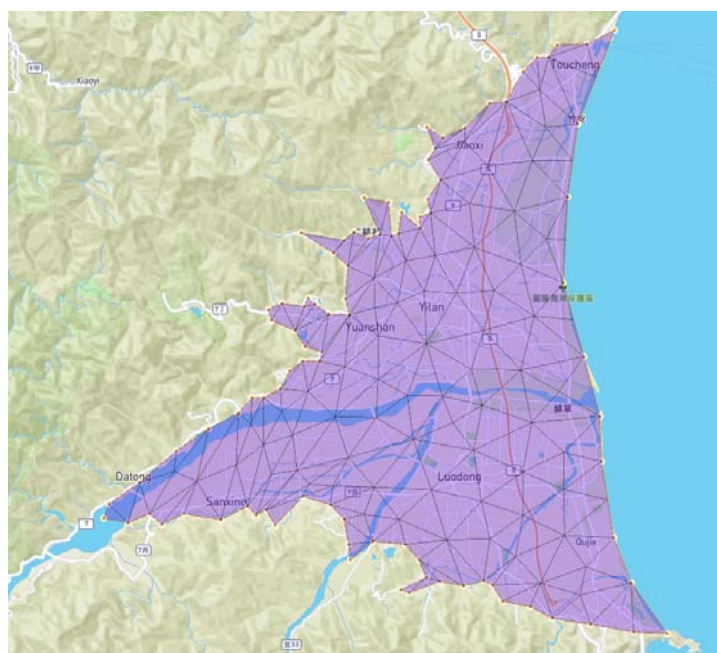


圖 63 蘭陽平原單一多邊形三角網格生成。

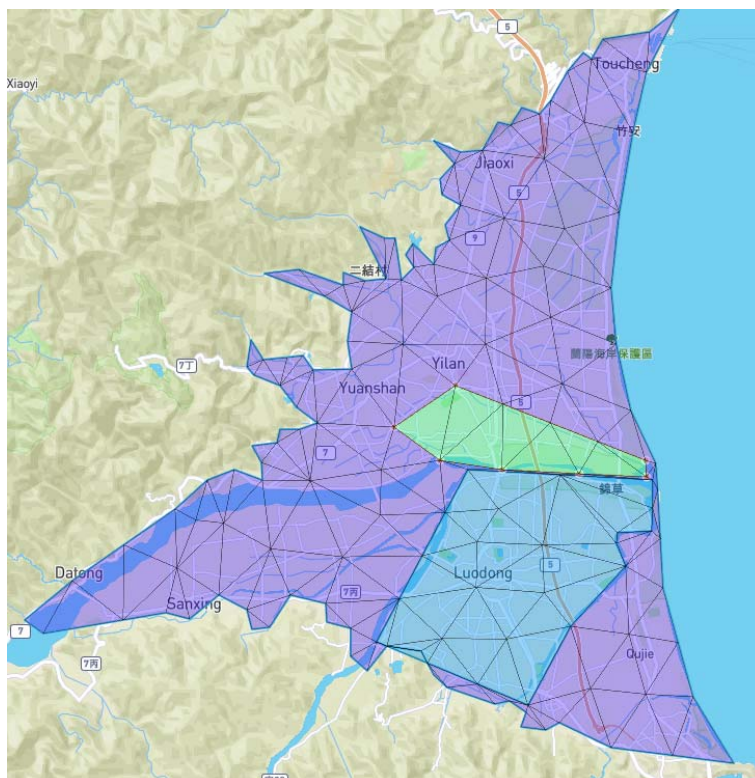


圖 64 蘭陽平原多個多邊形網格生成。

請選擇資料: 地下水觀測井位置圖_現存站 ▼ 加入

自定義圖層	參數設定	
▼ 自定義圖層群組		
點圖層		
線圖層		
▼ 多邊形圖層		
多邊形-1		

框選圖層	顯示	
模擬結果圖層	顯示	顏色
三角網格	☒	☒

圖 65 執行圖層管理介面(網格生成)。

5.7 地下水流場模擬

執行地下水流場模擬則必須先完成概念模式設置，此部份需經由點、線與面繪畫圖層所新增圖層，設定相關含水層參數，如此即可執行地下水流場模擬，本平台設定流場模擬操作按鈕如圖 62 所示。



圖 66 流場模擬操作按鈕。

透過以下測試案例，說明本研究所開發地下水流場模擬設定與模擬結果。在此這測試案例中，設計 5 層面的圖層，並設定其水力傳導係數，並且於左上角與右下角設定兩直線作為定水頭邊界條件。左上角直線節點設定固定總水頭為 1 m，而右下角節點固定總水頭為 0 m。在本模式預設邊界條件為不透水邊界條件，概念模式設定如圖 63。

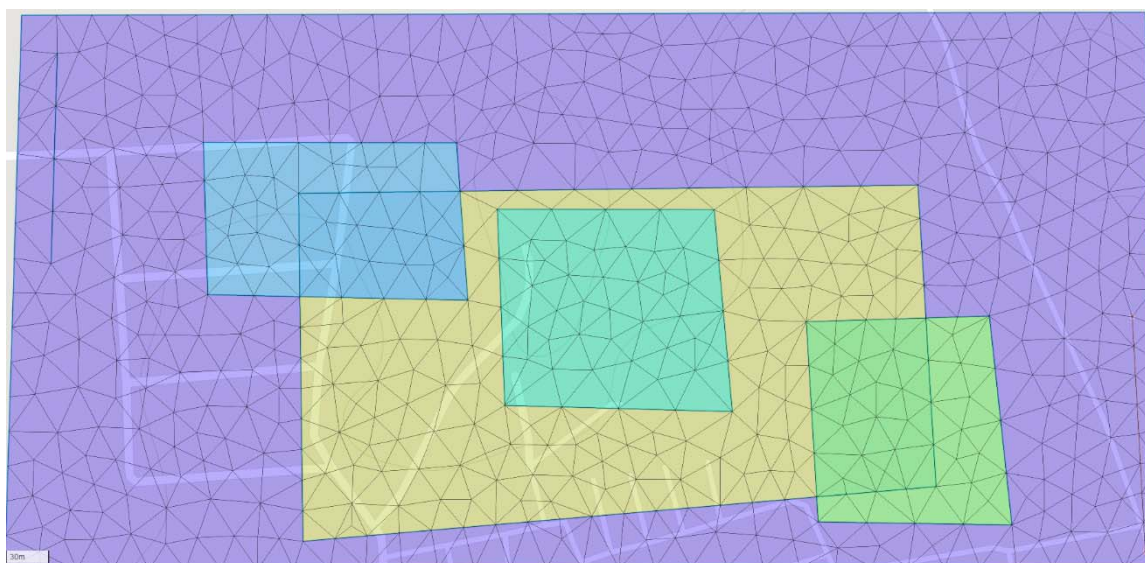


圖 67 測試例概念模式。

因為此測試例中設定兩直線作為定水頭邊界條件，地下水流場主要流動方向必定依循高水頭向低水頭，故經由圖 64 則可以發現左上角的總水頭最高，右下角的總水頭最低。

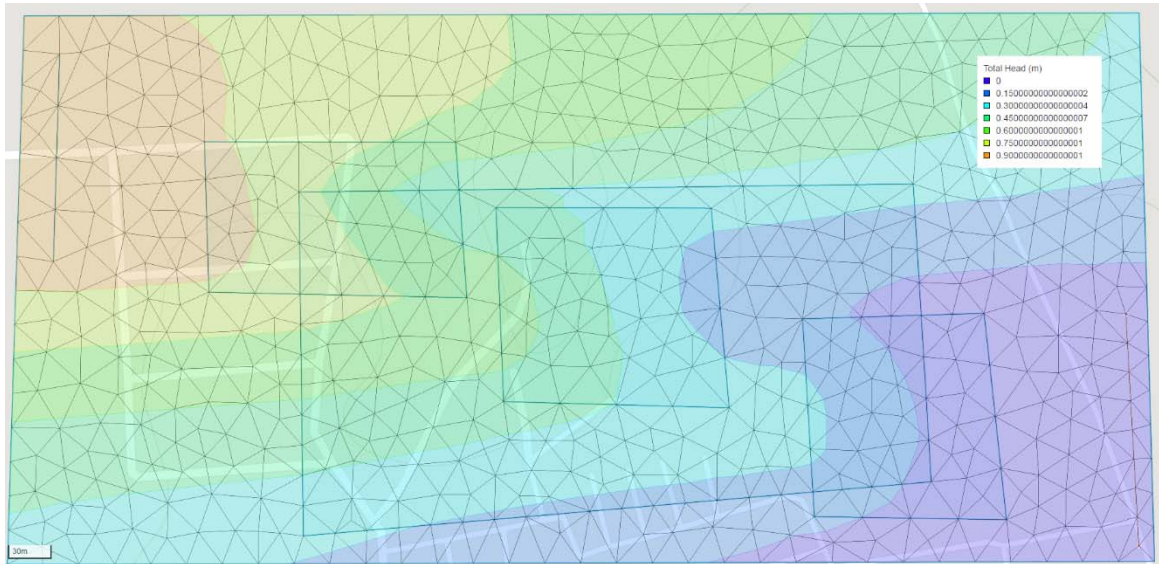


圖 68 測試例穩態流場模擬結果。

5.8 質點傳輸模擬

描述污染物傳輸行為，可以透過質點傳輸模擬表示污染物移動行為，在此設定污染物為保守性質點。執行質點傳輸模擬之前，必須先執行地下水流場模擬獲得地下水流速。為完成此項工作，本研究預先設定地下水位分佈與地表高層相關，並且未取得全台水力傳導係數分佈情況下，在此預設水力傳導係數為 1 m/day，計算每個網格點的地下水流速。未來若能在局部範圍獲得地質材料參數，將使用合適水力傳導係數計算該場址地下水流速。

本平台在執行質點傳輸模擬之前，必須開啟質點傳輸模擬，其按鈕形狀如圖 65。本研究可使用 4 種釋放質點模式，其中包含單點、折線、多邊形與放射源釋放質點，按鈕圖示如圖 66。



圖 69 開啟質點傳輸模擬按鈕。

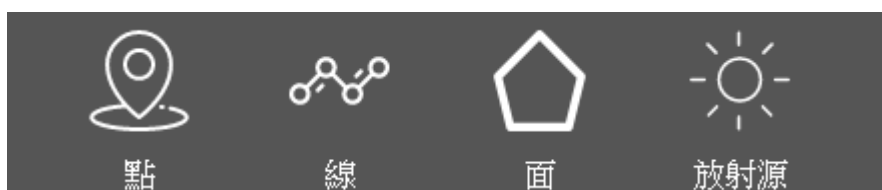


圖 70 釋放質點方式模擬按鈕。

圖 67 為本研究一組測試質點追蹤案例，在此案例假設在圖 67 上方藍色點為一口已知污染井，因此設置質點在起始位置於通報的污染水井，模擬時間為零。測試例假定地質材料為均質，水力傳導係數為 $1.0(\text{m}/\text{day})$ ，質點傳輸污染團推估範圍標準差設定為 $0.001(\text{m})$ ，質點追蹤模擬時間共計 $25,000(\text{day})$ 。圖 67 中可以發現質點前進時，平台同時計算其不確定範圍，由於無法將每一個質點不確定範圍皆繪出，如此則會造成無法辨識質點位置。因此，平台設計在繪製質點相具一定距離後，加繪製一個不確定範圍與該位置模擬步階數。

目前使用者可以藉由滑鼠移動至質點周圍時，網頁前段引擎將自動展示質點追蹤模擬時間步階。本研究使用質點傳輸標準差與模擬時間相乘，作為計算質點傳輸不確定範圍。這是因為本研究並未有更多水文地質參數，若未來具有此相關資料，則可以透過地質材料異質性作為設定與計算依據。對於此部份的成果展示，使用者可以依據需求修改繪製設定，並於設置相距 $300(\text{m})$ 繪製一次不確定範圍。

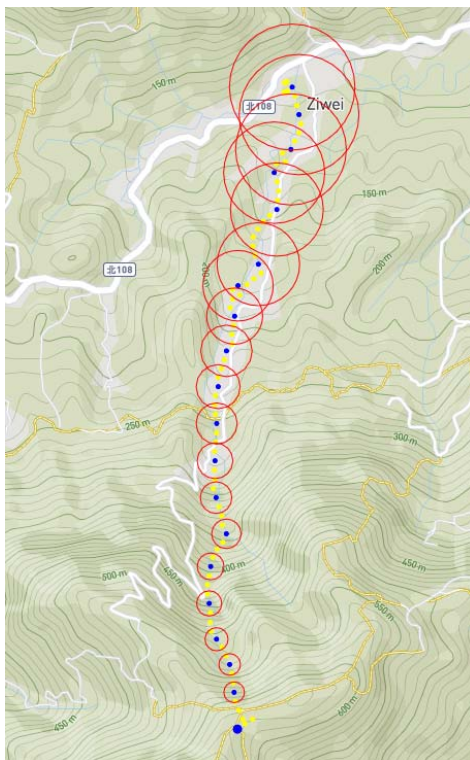


圖 71 單點質點傳輸模擬結果。

圖 68 為給定線段上多點釋放質點之測試模擬成果圖，使用者可以透過滑鼠操作設定線段端點位置，並且決定全部線段上，設置的質點個數。此外，亦可以利用放射狀是放質點，圖 69 為放射狀釋放質點追蹤模擬成果圖，使用者則可以任意決定釋放質點中心點位置、質點釋放半徑與質點個數，目前預設釋放質點方式為相同間距。

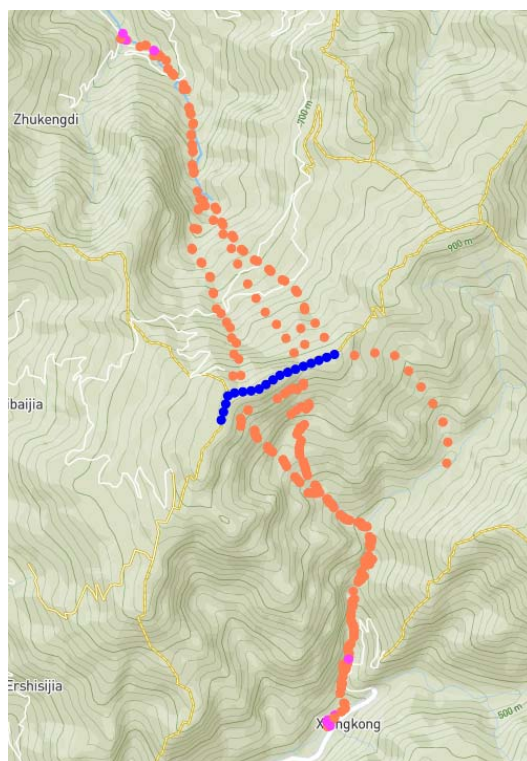


圖 72 折線質點傳輸模擬結果。

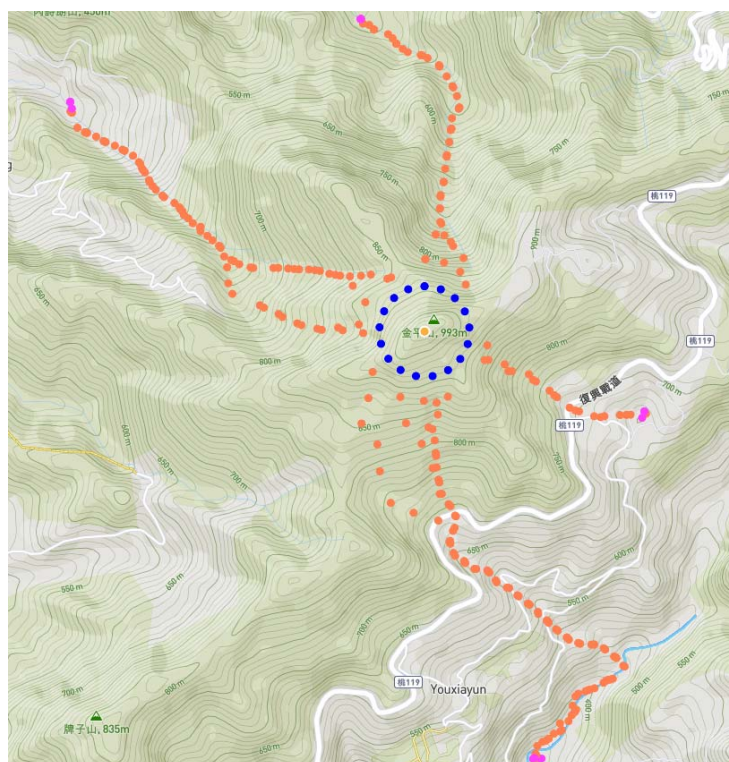


圖 73 放射源質點傳輸模擬結果。

圖 70 是平台展示多邊形區域釋放質點的模擬結果，本研究建議設置多邊形時僅需要注意減少線段間產生交叉，無論凸或凹多邊形，本研究皆可完成質點釋放，並且完成質點追蹤模擬計算。

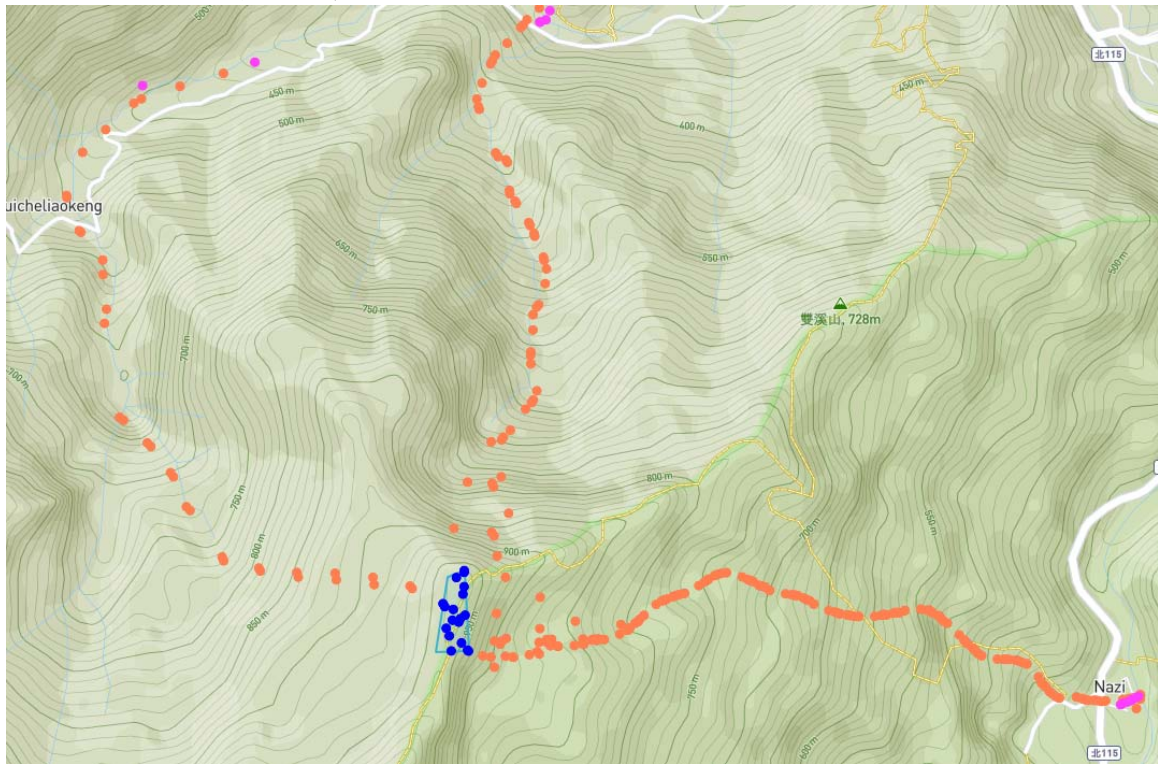


圖 74 多邊形質點傳輸模擬結果。

5.9 溶質傳輸模擬傳輸模擬

本研究平台已完成介接自動化網格生成模式，產生非規則三角網格。經由使用者操作介面，設定點、線、面圖層參數，作為地下水流場與溶質傳輸模擬重要參數設定。於本章節已介紹網格生成與流場模擬結果，在此則可以經由此兩模組直接運用於溶質傳輸模組。

圖 75 為本研究透過流場模式，設定模式東西兩測定水頭設定，水力梯度為 0.05，執行獲得穩態總水頭分佈，並假設在圖 76 位置發現有一污染團，在此由於本研究案並無獲得環保署提供相關地質鑽探岩心報告，因此假設此地層為均質材料，設定水力傳導係數為 100 m/day。經由此流場影響，執行 30 天模擬結果後，獲得溶質移動後的濃度空間分佈，如圖 77。

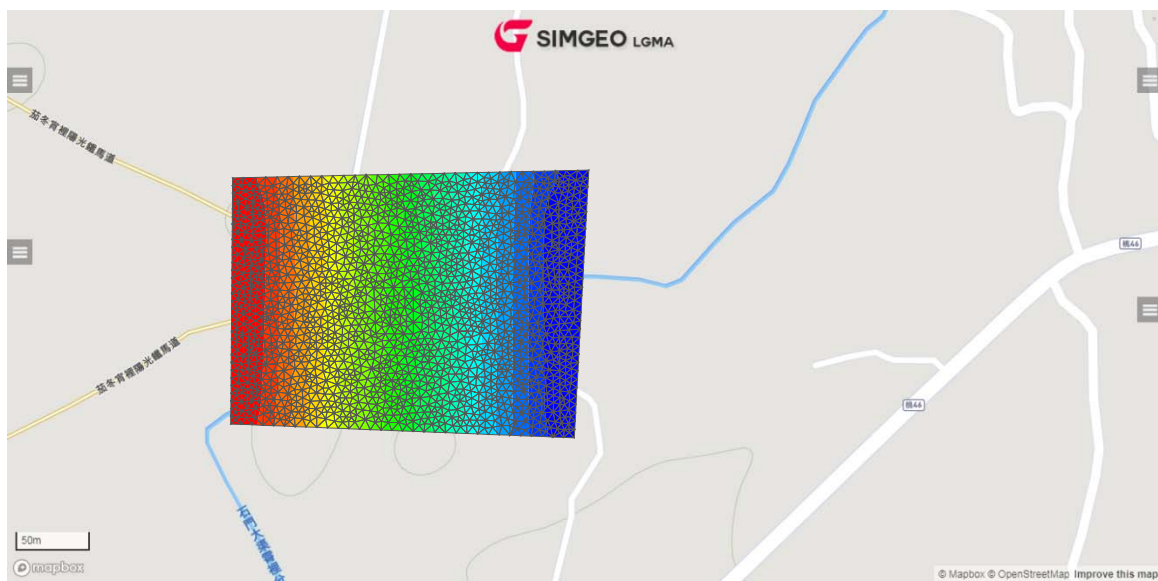


圖 75 溶質傳輸測試例之穩態流場分佈。

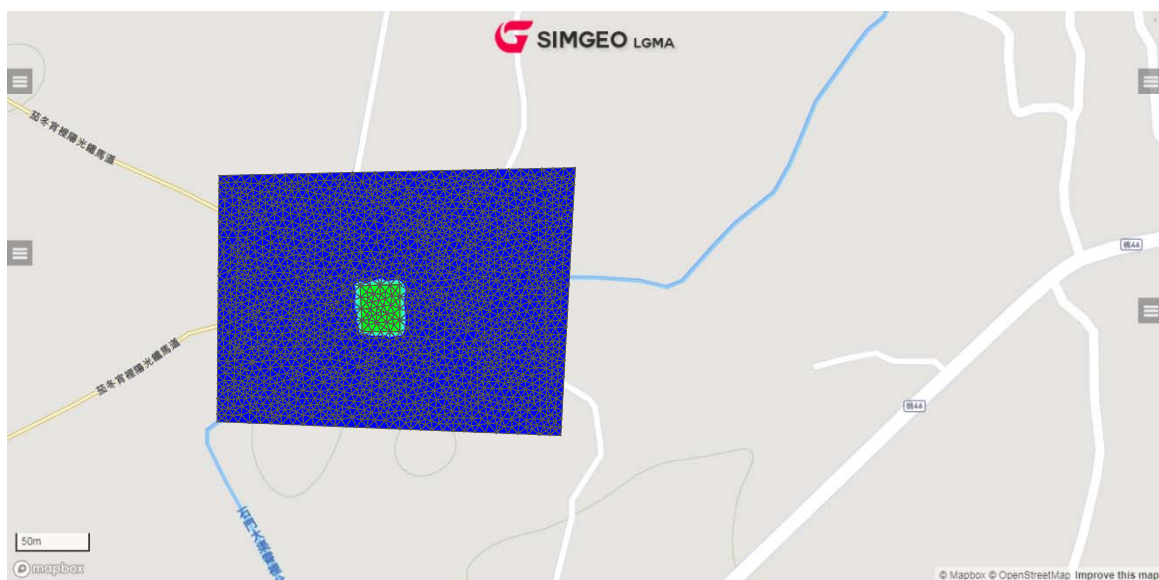


圖 76 初始濃度濃度團位置。

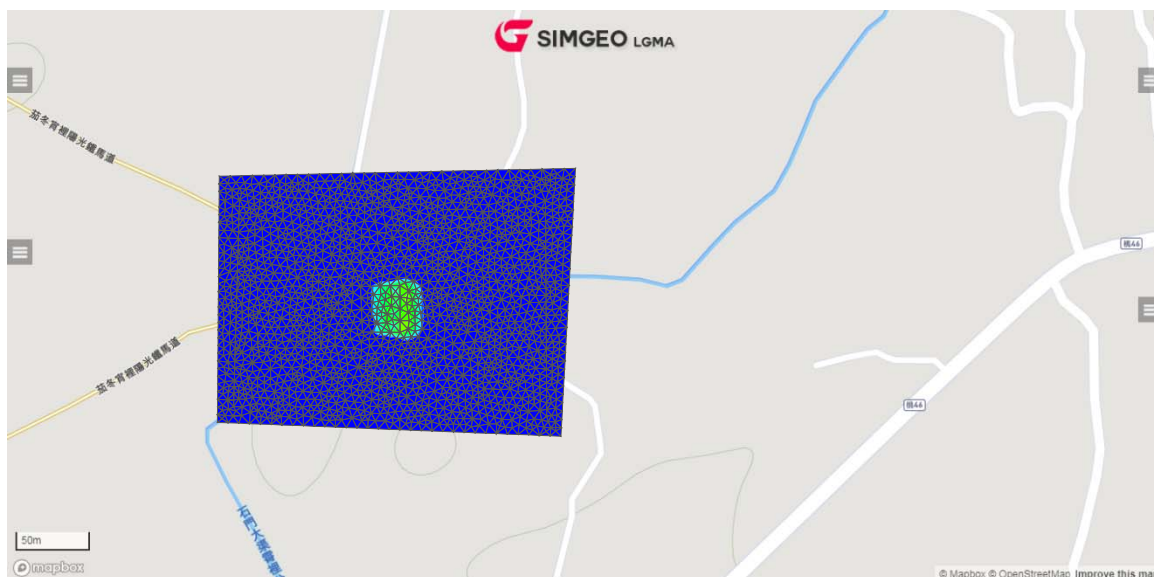


圖 77 濃度團 30 天遷移後情形。

5.10 虛擬化平台伺服器系統與平行多工執行

本平台藉由網頁形式呈現，因此必需要考量多人同時執行，或是單一個人執行多個網頁同時執行數值程序。在此情境下，伺服器必須具備控制每一個使用者操作程序。目前許多網路服務與雲端平台皆面臨此問題，故提昇伺服器處理能力，節省計算資源，並定需要處理速度較快的虛擬化平台，目前此技術稱為軟體容器 (Container)。著名 Google 平均於一週內，需啟動 20 億個 container 執行眾所周知的 Google 服務。

此虛擬化系統設定，是將所需應用程式以及相關所需要的系統環境統包在一起，讓每個應用程式共用電腦系統核心，但是皆有各字獨立的存放位置、網路環境、執行程序管理，如此設定就如同增加數部互相獨立的電腦，而每一台電腦都有特定 ID，而且在執行的程序都有特定的編號。重點在於每台電腦都可以利用 ID 與編號被伺服器所管理，包含執行、暫停與停止。

本研究所設計的虛擬化平台伺服器執行架構，如圖 78。使用者執行任務皆由使用者網頁瀏覽器設定，在此稱為前端。使用者可以透過瀏覽器設定任務包含，展示既有資料集、繪製自定義點、線、面圖層、執行地下水模式相關流程等任務。網頁瀏覽器透過網路將任務設定傳輸至伺服器，在此稱為後端。正如本節所述，平台式計算必定屬於多工平行，伺服器需要能夠同時掌控各個使用者需求，並將合適結果展是於前端。因此，使用者可以隨時送執行任務給後端，更可以傳送暫停與停止的指令。這些任務皆由伺服器分配至 container，執行完畢後，立即由 container 傳送至伺服器，伺服器再將結果傳送至特定使用者的瀏覽器，重要的在於此設定可以同時處理數個使用者與執行任務。



圖 78 虛擬化平台多工執行序。

5.11 結論與建議

本計畫已完成透過網頁平台便捷工具，可作為提供給環境工作第一線人員、民間顧問公司，以及環保署重要決策主管，皆可透過本平台展示過去既有重要環境資訊圖資，更可以進行加值運算。藉由地下水水位與地質鑽探岩心資料，即可取的該區域地下水流場資訊，結合場區內濃度觀測數據，即可與本研究開發模式執行平行驗證。更可藉由流場與傳輸模擬，執行溶質溯源追蹤追緝污染源，或是模擬未來污染路徑傳輸，作為緊急應變措施。

本研究研究成果符合本計畫整體預定進度，針對此計畫研究執行流程與平台開發成果完成以下結論與建議，如所述：

- (1) 本計畫已蒐集環保署、水利署以及地質調查所近 50 種以上之圖資，其中包括地下水文、河川水文、水資源保育、水庫防洪、自然資料、污染物等特性之資料。以上圖資皆已完成轉換資料格式為 GeoJSON 的格式，可以直接運用於平台展示與模式計算。
- (2) 本計畫完成資料展示平台介面與圖型化設計，並且將部分圖資資料庫列表與平台介面架接，成功於平台展示圖資與其屬性值。平台具備 Mapbox 開發工具的所有功能，使用者可以藉由平台修改圖層呈現方式。
- (3) 本計畫已完成資料展示平台基本繪圖功能，包括點、線及面之二維平面圖形規劃工具，並且具備自動紀錄符合 GeoJSON 格式之空間資訊與重要參數。
- (4) 本計畫已透過既有資料庫進行初步數值模擬測試，成功將觀測井內部屬性值(如地下水水位)進行差值分析，並且成功開發數值模式模擬結果繪圖工具，完成初步模擬平台圖型化結構。
- (5) 本計畫已成功開發線上質點追蹤計算模式，並且已成功應用至水井捕集區模式。
- (6) 本計畫已完成線上自動網格生成模式、地下水流場模擬，與污染物溶質傳輸模擬。
- (7) 本計畫所開發之模式，其適用情境包括前期調查、中期決策與後期評估等功能，然模擬結果之準確性係為根據使用者所蒐集資料之數量與精準性，本模

式並可配合使用者臨時更改模擬情境，提供快速之決策能力。

- (8) 根據本計畫所開發之模式之驗證、基本案例分析以及實場尺度分析等，由下階段所提案計畫持續進行之，未來期可把此技術應用之可行性提升，並可推廣至相關產官學研單位等進行使用與改善。

5.12 後續執行工作項目說明

- (1) 資料庫規格改善與重製：除環保署土壤地下水管理資訊系統及既有的外部單位開放資料，需再函請外部單位如農委會、各縣市環保及水利局等提供區域特定資料。開發非關聯式資料庫系統，提升資料存取量、讀取寫入效能提升、增加多類型檔案串流等。
- (2) 線上空間資料分析與數值模式計算引擎開發：本研究將在既有空間資料分析技術的基礎上，介接外部資料分析模組，再配合適當演算法，建構空間資料分析平台。插值部分先以距離反比法(inverse distance)及三角網格線性插值方法為主。
- (3) 完成線上地下水水流與污染傳輸模擬平台開發與測試：本計畫中將自主建構地下水水流與污染傳輸模擬計算程式，並與國際上常用的開放源分析程式如 MODFLOW、FEMWATER 與 MT3D 進行基礎案例分析，以驗證計算引擎演算法之正確性。
- (4) 實際場址案例驗證：本計畫將規劃一實際場址案例之使用程序，從最初始之資料庫調閱、邊界規劃、數值網格內插、模擬參數設定、而至後續之地下水流場、污染溯源以及污染傳輸等，並以現有之場址調查報告進行交互驗證，同時與 MODFLOW、FEMWATER 與 MT3D 之模擬結果比較，檢定本平台開發之程式對於現有狀況之適用性與準確性。
- (5) 國際 SCI 期刊撰寫與投稿：本計劃團隊為將工作內容及成果展示增加可見度與知名度，除研討會文章外，另將撰寫國內期刊以及國際相關領域之 SCI 期刊發表。

(六) 參考文獻

- [1] ArcGIS (2012) 10.1 Help.
- [2] Bachu S, Adams JJ (2003) Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution. *Energy Conversion and Management* 44: 3151-3175.
- [3] Bair ES (1991) Delineation of travel time-related capture areas of wells using analytical flow models and particle-tracking analysis. *Ground Water* 29, no. 3: 387-397
- [4] Bakr MI and Bulter AP (2004) Worth of head data in well capture zone design: deterministic and stochastic analysis. *Journal of Hydrology* 290 202-216.
- [5] Bakr MI and Bulter AP (2005) Nonstationary stochastic analysis in well capture zone design using first-order Taylor's series approximation. *Water Resource Research*. Vol.41, W01004.
- [6] Bear J and Jacobs M (1965) On the movement of water bodies injected into aquifer. *Journal of Hydrology* 3 NO.1: 37-57.
- [7] Barry DA, Prommer H, Miller CT, Engesgaard P., Brun A., and Zheng C. (2002) Modelling the fate of oxidisable organic contaminants in groundwater. *Advances in Water Resources* 25: 945-983.
- [8] Bonton A, Bouchard C, Rouleau A, driguez M J, and Therrien R. (2012) Calibration and validation of an integrated nitrate transport model within a well capture zone. *Journal of Contaminant Hydrology* 128: 1-18.
- [9] Council, N.R. (1995) On the Full and Open Exchange of Scientific Data, National Research Council, Committee on Geophysical and Environmental Data.
- [10] Dickinson JE, James SC, Mehl S, Hill MC, Leake SA, Zyvoloski GA, Faunt CC, Eddebbarh A-A (2007) A new ghost-node method for linking different models and initial investigations of heterogeneity and nonmatching grids. *Advances in Water Resources* 30: 1722-1736.
- [11] Franz T and Guiguer N (1990), FLOWPATH, two-dimensional horizontal aquifer simulation model. *Waterloo Hydrogeologic Software*, Waterloo.
- [12] Fadlilmawla AA, Dawoud MA (2006) An approach for delineating drinking water wellhead protection areas at the Nile Delta, Egypt. *Journal of Environmental Management* 79: 140-149.

- [13] Farajzadeh R, Barati A, Delil HA, Bruining J, Zitha PLJ (2007) Mass Transfer of CO₂ Into Water and Surfactant Solutions. *Petroleum Science and Technology* 25: 1493-1511.
- [14] Fenech C, Nolan K, Rock L, Morrissey A (2013) An SPE LC–MS/MS method for the analysis of human and veterinary chemical markers within surface waters: An environmental forensics application. *Environmental Pollution* 181: 250-256.
- [15] Ferrante M, Mazzetti E, Fiori A, Burini M, Fioriti B, Mazzoni A, Schirò G, Vacca G, Brunone B, Meniconi S, Capponi C (2015) Delineation of Wellhead Protection Areas in the Umbria Region. 1. A simplified Procedure. *Procedia Environmental Sciences* 25: 90-95.
- [16] Ferrante M, Mazzetti E, Fiori A, Burini M, Fioriti B, Mazzoni A, Schirò G, Vacca G, Brunone B, Meniconi S, Capponi C (2015) Delineation of Wellhead Protection Areas in the Umbria region. 2. Validation of the Proposed Procedure. *Procedia Environmental Sciences* 25: 96-103.
- [17] Franzetti S and Guadagnini A (1996). Probabilistic estimation of well catchments on heterogeneous aquifers. *Journal of Hydrology* 174: 149-171.
- [18] Great Britain. Committee of Enquiry into the Handling of Geographic, I. (1987) Handling geographic information : report to the Secretary of State for the Environment of the Committee of Enquiry into the Handling of Geographic Information / chairman, Lord Chorley, H.M.S.O, London.
- [19] Guadagnini A and Franzetti S (1999). Time-related capture zones contaminants in randomly heterogeneous formations. *Ground Water* 97(2):253-260.
- [20] Guadagnini A. et al, (2003). Mean travel time of conservative solutes in randomly heterogeneous unbounded domains under mean uniform flow. *Water Resource Research*. 39, 1050, doi: 10.1029/2002WR00181
- [21] Haitjema H., et al. (1994). “WHAEM: Program documentation for the wellhead analytic element model”, EPA/600/R-94/210. Washington, DC: U.S. EPA, Office of Research and Development.
- [22] Harman WA, Allan CJ, Forsythe RD (2001) Assessment of potential groundwater contamination sources in a wellhead protection area. *Journal of Environmental Management* 62: 271-282.
- [23] Ian, H. (2010) *An introduction to geographical information systems*, Pearson Education India.

- [24] Lathrop, D. and Ruma, L. (2010) Open Government: Collaboration, Transparency, and Participation in Practice, O'Reilly Media.
- [25] Javandel I and Tsang CF (1987) Capture-zone type curves: a tool for aquifer cleanup. *Ground Water*, 24(5): 616-625.
- [26] Kinzelbach W et al. (1992). Determination of groundwater catchment areas in two and three spatial dimensions”, *Journal of Hydrology*. 134, 221-246.
- [27] Klammler H, Hatfield K, Mohamed MM, Perminova IV, Perlmutter M (2014) Capture and release zones of permeable reactive barriers under the influence of advective–dispersive transport in the aquifer. *Advances in Water Resources* 69: 79-94.
- [28] Kompani-Zare M, Zhan H, Samani N (2005) Analytical study of capture zone of a horizontal well in a confined aquifer. *Journal of Hydrology* 307: 48-59.
- [29] Kunsrmann H. and Kinelbach M. (2000). Computation of stochastic wellhead protection zones by combining the first-order second-moment and Kolmogorov backward equation analysis. *Journal of Hydrology*. 297(3-4):127-146.
- [30] Kunstmann H, Kastens M (2006) Determination of stochastic wellhead protection zones by direct propagation of uncertainties of particle tracks. *Journal of Hydrology*, Vol. 323, 215-229
- [31] Li, S., Dragicevic, S. and Veenendaal, B. (2011) Advances in Web-based GIS, *Mapping Services and Applications*, CRC Press.
- [32] Li S-G, McLaughlin D (1991) A nonstationary spectral method for solving stochastic groundwater problems: Unconditional analysis. *Water Resour Res* 27: 1589-1605.
- [33] Li SG, McLaughlin D (1995) Using the nonstationary spectral method to analyze flow through heterogeneous trending media. *Water Resources Research* 31: 541-551.
- [34] Li SG, et al. (2004). Stochastic modeling of complex nonstationary groundwater systems. *Advances in Water Resources*.
- [35] Longley, P. (2005) *Geographic Information Systems and Science*, Wiley.
- [36] Lu Z and Zhang D (2003). On stochastic study of well capture zones in bounded, randomly heterogeneous media. *Water Resources Research*, Vol. 39, NO.4, 1100.
- [37] McDonald MG and Harbaugh AW. (1998). *A modular three dimensional finite-difference ground-water flow model*. USGS Techniques of Water Resources Investigations Book 6, Ch. A1, 586p.3
- [38] Mao X, Prommer H, Barry DA, Langevin CD, Panteleit B, Li L (2006)

Three-dimensional model for multi-component reactive transport with variable density groundwater flow. *Environmental Modelling & Software* 21: 615-628.

- [39] Mehl S, Hill MC (2002) Development and evaluation of a local grid refinement method for block-centered finite-difference groundwater models using shared nodes. *Advances in Water Resources* 25: 497-511.
- [40] Mehl S, Hill MC (2004) Three-dimensional local grid refinement for block-centered finite-difference groundwater models using iteratively coupled shared nodes: a new method of interpolation and analysis of errors. *Advances in Water Resources* 27: 899-912.
- [41] Miralles-Marco A, Harrad S (2015) Perfluorooctane sulfonate: A review of human exposure, biomonitoring and the environmental forensics utility of its chirality and isomer distribution. *Environment International* 77: 148-159.
- [42] Molson JW, Frind EO (2012) On the use of mean groundwater age, life expectancy and capture probability for defining aquifer vulnerability and time-of-travel zones for source water protection. *Journal of Contaminant Hydrology* 127: 76-87.
- [43] Ni C.F. and Li S.G. (2005). Simple closed form formulas for predicting groundwater flow model uncertainty in complex, heterogeneous trending media. *Water Resources Research*. 41(11), W11503.
- [44] Ni C.F. and Li S.G. (2006). Modeling groundwater velocity uncertainty in nonstationary composite porous media. *Advances in Water Resources* 29(12), 1866-1875.
- [45] Ni C.F., Li S.G. (2008). Efficient conceptual framework to quantify flow uncertainty in large-scale, Highly nonstationary groundwater systems. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- [46] Olyazadeh, R., Sudmeier-Rieux, K., Jaboyedoff, M., Derron, M.H. and Devkota, S. (2017) An offline–online Web-GIS Android application for fast data acquisition of landslide hazard and risk. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17(4), 549-561.
- [47] Paradis D. et al. (2007) Comparative study of methods for WHPA delineation. *Ground Water*, Vol 45, No.2, 158-167.
- [48] Prommer H, Barry DA, Davis GB (2002) Modelling of physical and reactive processes during biodegradation of a hydrocarbon plume under transient groundwater flow conditions. *Journal of Contaminant Hydrology* 59: 113-131.

- [49] Pruess K (2005) *ECO2N: A TOUGH2 fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO2* Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley
- [50] Pollock DW (1998). Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three dimensional finite-difference ground-water flow model. *USGS Open-File Report* 89-381. Reston, Virginia: Office of Ground Water.
- [51] Riva M. et al. (2006). Assessment of uncertainty associated with the estimation of well catchments by moment equations. *Advances in Water Resources* 29: 679-691.
- [52] Rock G and Hans K (2002). Numerical delineation of transient capture zones. *Journal of Hydrology* 269: 134-149.
- [53] Rowan JS, Black S, Franks SW (2012) Sediment fingerprinting as an environmental forensics tool explaining cyanobacteria blooms in lakes. *Applied Geography* 32: 832-843.
- [54] Samani N, Zarei-Doudeji S (2015) *A General Analytical Capture Zone model: A Tool for Groundwater Remediation*. IFAC-PapersOnLine 48: 234-239.
- [55] Schafer DC (1996). "Determining 3D capture zone in homogeneous, an isotropic aquifer" *Ground Water* 34(4):628-369.
- [56] Shafer J M (1990). *GWPATH. Version 4.0 Champaign*, Illinois State Water Survey Division.
- [57] Shan C (1999). "An analytical solution for the capture zone of two arbitrarily located wells". *Journal of Hydrology* 222: 123-128.
- [58] Simmons CT, Narayan KA (1997) Mixed convection processes below a saline disposal basin. *Journal of Hydrology* 194: 263-285.
- [59] Stauffer F, Guadagnini A, Butler A., Franssen, HJ H., Van De Wiel, N, Bakr, M, Guadagnini L (2005). Delineation of source protection zones using statistical methods. *Water Resources Management* 19, 163-185.
- [60] Stauffer F (2005). Delineation of source protection zones using statistical methods. *Water Resources Management*, 19(2), 163-185.
- [61] Stichler W, Maloszewski P, Bertleff B, Watzel R (2008) Use of environmental isotopes to define the capture zone of a drinking water supply situated near a dredge lake. *Journal of Hydrology* 362: 220-233.
- [62] Todd DK (1980) *Groundwater Hydrology*, 2nd ed. New York: John Wiley.

- [63] U.S. EPA. (1991). *WHPA A modular semi-analytical model for the delineation of wellhead protection zones*. Office of Groundwater Protection, Washington, DC.
- [64] U.S. EPA. (1994) *Ground water and wellhead protection handbook*. EPA-625/R-94-001. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of water.
- [65] Van Leeuwen, M, Chris BM, Bulter AP., and Jacob AT, (1999). Stochastic Determination of the Wierden (Netherkands) Capture zones. *Ground Water* 37, 8-17.
- [66] Vieux BE, Mubarak MA, Brown D (1998) Wellhead protection area delineation using a coupled GIS and groundwater model. *Journal of Environmental Management* 54: 205-214.
- [67] Xu X, Chen S, Zhang D (2006) Convective stability analysis of the long-term storage of carbon dioxide in deep saline aquifers. *Advances in Water Resources* 29: 397-407.
- [68] Yeo, I.-A. and Yee, J.-J. (2016) Development of an automated modeler of environment and energy geographic information (E-GIS) for ecofriendly city planning. *Automation in Construction* 71, Part 2, 398-413.
- [69] Zarei-Doudeji S, Samani N (2014) Capture zone of a multi-well system in bounded peninsula-shaped aquifers. *Journal of Contaminant Hydrology* 164: 114-124.
- [70] Zhang C and Bennett GD (2002). *Applied Contaminant Transport Modeling*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [71] Zhang D and Lu Z (2004). Stochastic delineation of well capture zones. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18(1): 39-46.
- [72] Zhan H (1998) Analytical and numerical modeling of a double well capture zone” *Journal of Mathematical Geology*, 31(2): 175-193.
- [73] Zhan H (1999) Analytical study of capture zone to horizontal well. *Journal of Hydrology* 217: 46-54.