



環境部環境管理署

112 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰 減與健康風險整合評估軟體開發

期末報告（定 稿）

主 辦 單 位： 環境部環境管理署

專案執行單位：國立中央大學／高等模式研發應用中心

專案主持人：陳瑞昇 教授

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

中 華 民 國 113 年 11 月 印製



專案基本資料表

專案性質		☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質		專案類別(單選)		☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型	
研究主題		☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他					
申請機構系所		國立中央大學高等模式研發應用中心					
機構地址		桃園市中壢區中大路 300 號					
專案主持人		陳瑞昇		職等／職稱		教授	
協同主持人		梁菁萍		職等／職稱		教授	
專案 名稱	中文	地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發					
	英文	A software package for evaluating monitored natural attenuation and health risk of a groundwater chlorinated solvent contaminated site					
	關鍵字	軟體開發、含氯溶劑、監測式自然衰減、健康風險					
執行期程		自民國 112 年 12 月 15 日起至民國 113 年 11 月 29 日止					
專案主持人		姓名：陳瑞昇		E-mail： jschen@geo.ncu.edu.tw		專線：03-2807427 手機：0932360361	
專/兼任人員		姓名：陳琤雯		E-mail： akeyuke.0109@gmail.com		專線：65865 手機：0928772731	
經費 分 析 總 表 (僅模場試驗專 案需填寫兩年 度金額)	專 案 預 估 總 經 費		第一年 申請經費		第二年 申請經費		編列說明
	1.	人事費用	827,580				將蒐集彙整大量資料及建立開發評估軟體，需較多人力資源以提高時間效率，故人事費編列金額超出比率。 (1~5 項相加之 50%為限)
	2.	設備使用含維護費	10,000				(與計畫實驗相關)
	3.	耗材與主要費用	10,000				(與計畫主體相關)
	4.	其它研究相關費用	14,320				(含差旅與租賃費用)
	5.	行政管理費	152,100				(1~5 項相加之 15%為限)
	6.	自籌款	0				(申請單位自行籌備款項)
	申請補助經費(1~5 項)		1,014,000				總金額：1,014,000
	計畫總經費(1~6 項)		1,014,000				總金額：1,014,000

專案主持人：_____（簽名或蓋章） 日期：_____



112 年度專案成果績效自評表

填表日期： 113 年 11 月 29 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	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其他		
執行機構	國立中央大學高等模式研發應用中心	專案主持人	陳瑞昇
專案名稱	地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 成果		

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 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學術產出及活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	0	0	0		
		(2)研討會論文	1	0	0		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0		當初規劃沒有考慮申請專利，但目前申請專利中，專利公司提醒不能揭露，因此暫不考慮發表論文
		(2)國際研討會 論文發表	1	0	1		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	1	0	1		
		(2)研究報告	1	0	1		
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 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		
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1	0	1		
		(2)技術平台		0	0		
	7.技術獎項(項數)		1	0	0		獲邀請參



目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
項目							
							加 土 水 交 流 媒 合
B 人 才 培 育	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	0	1		
		(2)博士	0	0	0		
	9.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	0	0		
		(2)跨機構團隊	0	0	0		
		(3)形成研究中心	1	0	1		
		(4)形成實驗室	0	0	0		
	10.其他指標 (請自行命名)		(請自填)				



(二) 產業面

項目			目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧 財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明	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 技術轉 移	2.先期技術 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 (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 (應用技術)	件數		10	0	0		
		授權金(仟元)		30	0	0		目前洽談中
		衍 生 利 益 金 (仟元)		300	0	0		目前洽談中
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		0	0	0		
(2)品種/系 (件數)		0	0	0				
C 產學研 合作	6.促成合作 研究	件數		0	0	0		
		金額(仟元)		-	0	0		
	7.促成投資	件數						
		投資金額 (仟元)						
	8.促成取得 業界科專	件數						
		業界投資金額 (仟元)						
9.其他指標 (請自行命名)			(請自填)					



(三) 政策面

目標達成程度			申請預估數	期中達成數	成果達成數	結案後半年達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
項目							
A 服務 便民	1.技術服務	次數	1	0	0		
		收入(仟元)	100	0	0		目前進行中
	2.諮詢服務	次數	1	0	0		
		收入(仟元)	100	0	0		目前進行中
B 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策	0	0	0		
		(2)法規	0	0	0		
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)		20	0	0		
	5.整治成本降低(%)		20	0	0		尚待實場應用
	6.提升能源效率(%)		20	0	0		尚待實場應用
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

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

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)
1.參與國際研討會發表論文 1 篇。 2.培育 2 名碩士生。
產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)
1.開發全球作先進的軟體 MUST 2 一套全球推廣。 2. 申請美國與台灣專利中。 3. 有廠商洽談技術移轉。
政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污場址管理等政策及法規研訂之參考)
1.減少廢棄物產生與節約能源使用。 2.整治費用降低與含氯溶劑污染物整治效益提升，達到撙節費用，妥善運用監測與整治資源



四、主要研究人力

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

姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	*每月平均投入 工作日數比率(%)
陳瑞昇	國立中央大學應用地質研究所	教授	MNA 傳輸模式；圖形使用者介面設計與規劃；撰寫報告。	30%
梁菁萍	輔英科技大學護理系	教授	健康風險評估模組；圖形使用者介面設計與優化	50%
廖中翊	國立中央大學高等模式研發應用中心	博士後研究	MNA 傳輸模式	30%
戴永裕	國立中央大學高等模式研發應用中心	平台組組長	圖形使用者介面程式開發	100%
廖泓硯	國立中央大學應用地質研究所	碩士生	協助圖形使用者介面程式開發	50%
林禹昇	國立中央大學應用地質研究所	碩士生	協助行政事務	50%
張子寬	國立中央大學應用地質研究所	碩士生	協助案例測試、使用者體驗(UX)、使用者手冊編輯	50%
許力元	國立中央大學應用地質研究所	碩士生	協助案例測試與案例影片製作	50%

五、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

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



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

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

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：陳瑞昇 NO：B3	
計畫名稱	地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 國內外投稿、技術轉移、便民服務、及技術效益成果未達預期，其餘項目均達標。 2. 開發一套可以同時執行監測式自然衰減與健康風險整合評估的模擬軟體 MUST，建議可強化 (1) 模式模擬的結果驗證以確認模擬結果的正確性。 (2) 對模式適用情境、需要得到正確度高模擬結果的需求輸入資料量、與影響因子的說明，以利模式的正確應用與推廣。		1. 謝謝委員意見，後續會加強相關預期目標之完成，國外投稿已接受美國地球物理聯盟(American Geophysical Union, AGU)年度會議(約 2 萬 5 千人)海報論文發表，將於 2024 年 12 月 12 日下午發表，同時於展覽區連續 4 天設置展示攤位介紹開發完成的軟體 MUST version 2.0，配合 AGU 年會的 10 個案例影片已經上傳 Youtube (https://www.youtube.com/watch?v=kG-gCP-IOvs) 方便使用者自主學習，目前也印製 1000 份 MUST version 2.0 摺頁至 AGU 年會宣傳，後續將優先針對瑞昶、霖昌、台境與亞泰公司進行相關技術轉移。 2. 謝謝委員意見，(1)後續會進行相關實場的資料取得，進行相關校正與驗證，確認模擬結果的正確性與信賴度。(2)也會加強模式適用情境、需要得到正確度高模擬結果的需求輸入資料量、與影響因子的說明，以利模式的正確應用與推廣。	
委員二 1. 本計畫「地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發」之成果報告，已完成工作項目含「場地管理模組」、「MNA 評估模組」、「健康風險評估模組」等三項主要工作項目，相關成果並已呈現於成果報告，符合計畫之規劃進度與目標。 2. 本計畫研發團隊之研究成果(MUST 軟體系統)具自我學習或教育的「基礎模組」與適用地		1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定，研發團隊樂意在主管機關(土基會)指導下積極推展本研究整合評估軟體在國內場址之應用。	



下水污染場址管理實務應用的「場址模組」除了具有國外推廣的潛力，值得進行國際推廣外，國內土壤地下水污染場址中亦有許多適於推展 MNA 及健康風險評估、風險控管等工法，建議研發團隊及主管機關(土基會)可考慮積極推展本研究整合評估軟體在國內場址之應用。	
委員三 1. 本年度成果符合計畫書執行內容與進度。 2. 成果績效自評表申請預估項目與數量，截至目前部分已達成，部分未達成(或是未填)，請補充，至今未達成也請填結案後半年是否會投稿或說明原因。 3. 本計畫為前期計畫「地下水含氯溶劑污染場址健康風險評估軟體開發」之延伸，本年度執行內容分成三個模組(1)場址空間資訊分析資料庫與地理視覺化模組；(2)監測式自然衰減(MNA)評估與(3)健康風險評估。開發之軟體內容都已敘述在報告中。模組(1)場址空間資訊分析資料庫與地理視覺化與(3)健康風險評估模組為去年先期計畫之精進，所以建議成果報告以先期計畫成果為基準點，強調出精進之重點、亮點與效益。 4. 模組 2 為 MMA，本期成果之敘述似為與健康風險評估互為獨立，但有 MNA 之情境下，應會改變健康風險。	1. 謝謝委員意見。 2. 謝謝委員意見，會重新修正成果績效表，國外投稿已接受美國地球物理聯盟(American Geophysical Union, AGU)年度會議(約 2 萬 5 千人)海報論文發表，將於 2024 年 12 月 12 日下午發表，同時於展覽區連續 4 天設置展示攤位介紹開發完成的軟體 MUST version 2.0，配合 AGU 年會的 10 個案例影片已經上傳 Youtube (https://www.youtube.com/watch?v=kG-gCP-IOvs)方便使用者自主學習，目前也印製 1000 份 MUST version 2.0 摺頁至 AGU 年會宣傳，後續將優先針對瑞昶、霖昌、台境與亞泰公司進行相關技術轉移。 3. 謝謝委員意見，成果報告以先期計畫成果為基準點，強調出精進之重點、亮點與效益。 4. 謝謝委員意見，MNA 模組為地下水汙染傳輸模式，我們的功能比傳統的 MNA 模組 BIOCHLOR 更為強大，除 MNA 外，也可以進行如 REMChlor 的污染源與溶解污染團同時整治的評估，健康風險模組與 MNA 模組並非各自獨立，健康風險評估是以 MNA 地下污染傳輸模擬結果為基礎，因此是在不同管理情境下污染物模擬的健康風險評估，如果是採用 MNA 則就是 MNA 的健康風險。



委員四

1. 本研究為跨國跨校團隊，未來技術轉移與應用上如何界定專利權，請說明本軟體適用性，例如區域地下水文條件差異等。
2. 第三章結果與討論撰寫程式應用步驟，建議以流程圖呈現，同時請以模擬場址案例提供應用結果。
3. 請具體說明結論與建議。

1. 依目前相關規定相關專利權不屬於個人，只屬於計畫執行單位中央大學，軟體的任何技術移轉與專利申請都需中央大學智財委員會同意。。適用地下水流條件應該是沒有太大抽水擾動的區域地下水流，特別是 MNA 評估，若有抽水擾動可採用本團隊另一地下環境模擬軟體 THMC(<https://www.youtube.com/watch?v=amvvC8v1uYU>)進行更複雜的模擬。
2. 謝謝委員意見，將加入流程圖，但相關模擬場址案例目前並未取得相關觀測資料。
3. 謝謝委員意見，會強化結論與建議。

委員五

1. 本計畫在既有的 MUST 軟體，新增包括「場址模組」加入 GIS 資料及健康風險模式，確有助於使用者需求。
2. 成果報告建議納入以實場數據進行軟體分析後的成果，以評估及呈現本軟體的成效，並可適度驗證本軟體分析結果是否適用。
3. 未來計畫若再持續申請 113 年計畫，建議計畫中包含本軟體操作及宣傳之工作坊，有利於計畫期間即加入使用者建議，使本軟體之功能操作更符合使用者之需求。
4. 系統呈現請加上圖例說明，基本最少要有指北、地下水流向、比例尺等資料。
5. 污染來源可以 S1 標示，英文縮簡寫請備註全名。
6. MUST2 以考慮時變性污染源與分歧式降解反應的三維含氯污染物與降解產物共存的污染傳輸解析解模式作為核心，未來計畫若再持續申請 113 年計畫，是否可能於軟體中新增氧化還原以外的化學反應參數(如吸附、錯合、沉澱)，使地下水污染物傳輸之預測更為精確。

1. 謝謝委員肯定。
2. 謝謝委員意見，模擬的信賴度取決於模擬結果能與場址現地觀測的地下水水位與監測的污染物濃度，由於污染場址的地下水水位與污染物濃度容易有季節性變化，因此需藉由較高頻率的現地觀測的地下水水位與較多次的地下水水質採樣與分析去掌握地下水水位與污染物濃度的季節性變化，如此模擬結果能與更多的季節性變化的資料比較，以呈現模擬結果的信賴度。團隊以前曾取得相關現地資料，以我們的所開發的解析解進行與現地資料的比較，可以合理模擬出與現地資料一致的結果，但受限執行工作的顧問公司地下水水位觀測、水質採樣的頻率、監測井位置數量不足，相關的現地數據不足以完成具高信賴度的校正與驗證，因此團隊在後續希望爭取模場計畫的支持，希望在足夠的經費下團隊親自規劃具有品質的較高頻率的地下水水位觀測與污染物濃度間去確實掌握地下水水位與污染物濃度的季節性變化。整體目標希望從現地的調查到模式的應用建立系統性含氯溶劑地下水污染場址的地下水流場與污染物遷移調查、評估與模擬以及健康風險評估的標準流程，提供具有科學佐證的污染物遷移模擬與健康風險評估，相關污染物遷移模擬與健康風險評估的成果可以提供作為預測地下水污染的未來趨勢、評估監測式自然衰減有效性等行政管制策略參考基礎或作為公正



信任的社會溝通。

3. 謝謝委員意見，本團隊認知軟體開發的紅利就是向全球推廣，讓更多人使用，本團隊已完成 10 個案例影片上傳 Youtube

(<https://www.youtube.com/watch?v=kG-gCP-IOvs>)

方便使用者自主學習。本年度也曾對鑫訓、瑞昶、霖昌、國網中心、中央大學地科系與與台大生工系進行 MUST 軟體使用的教育訓練，後續會繼續舉辦本軟體操作及宣傳之工作坊，納入使用者回饋，使本軟體之功能操作更符合使用者之需求。

4. 謝謝委員意見，後續將加入圖例說明，包括指北、地下水流向、比例尺等資料。

5. 謝謝委員意見，以進行相關修正。

6. 謝謝委員意見，MUST 主要考慮一階降解反應降解反應的三維含氯污染物與降解產物共存的污染傳輸解析解模式作為核心，如果要考慮更複雜反應(氧化還原以外的化學反應參數如吸附、錯合、沉澱)，可使用本研究團隊的另一地下環境模擬軟體 THMC

(<https://www.youtube.com/watch?v=amvvC8v1uYU>)，使地下水污染物傳輸模擬更貼近真實世界。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

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

計畫年度	112 年度		計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型	
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他			主持人：陳瑞昇 NO：B3	
計畫名稱	地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發				
審查意見			執行單位回覆		
委員一			1. 謝謝委員意見，將於期末報告說明開發 MNA 評估模組的適用條件。進行任何地下水模擬首要工作是定義模擬的目的，根據模擬目的選用合適的模式，一般可選用解析解模式與數值解模式，解析解模式假設的是平均地下水流，並不去考慮地下水流場季節性的變化，數值解模式則可以考慮三維季節性地下水流場的變化，由於經費、人力與時間的因素真實世界的很多地下水污染場址並沒有很足夠的場址資料利用數值解模式進行模擬，因此解析解相關的 MNA 的評估軟體如美國環保署的 BIOCHLOR 反而是主流工具，要讓模擬的信賴度更高最重要的是有長期的地下水水位觀測，以更確實掌握地下水流場的變化，如此才能應用三維地下環境數值解模式，解析解在地下水流場有季節性變化仍然可進行模擬，但考慮的是平均的地下水流場，不管在台灣或全球都有其可應用性。		
3. 宜說明開發 MNA 評估模組的適用條件。若以「執行團隊曾經在台灣污染場址的模擬經驗，相關污染場址的地下水位觀測頻率並不高，常常無法掌握地下水流場的季節性變化，因此也會影響模擬的信賴度」，則所開發模式在臺灣如何進行實務應用性應說明。			2. 謝謝委員指正，將於期末報告加以潤飾。		
4. 報告中有數處連續數十個字無任何標點的情況，例如「以考慮時變性污染源與分歧式降解反應的三維含氯污染物與降解產物共存的污染傳輸解析解模式作為核心的具圖形使用者介面 MNA 評估模組」、「」，請加以潤飾修改以提升可讀性。			3. 謝謝委員指正，由於是團隊自行開發，目前的版本主要是建立含氯溶劑地下水污染場址智慧 GIS 管理工具的架構，有很多可以繼續精進，也一定可以加入更新內建水文等資料的功能。後續將於 2024 年 12 月 9 日~12 月 13 日舉行的美國地球物理聯盟年會(American Geophysical Union Annual Meeting) 的中央大學高等模式中心所設立的展覽攤位進行分享試用版，希望透過使用者意見回饋修正功能。		
5. 已完成場址空間資訊分析資料庫與地理視覺化模組，界面可視度效果佳。後續是否有更新內建水文等資料的功能？					



委員二 3. 本研發計畫「地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發」為MNA 及健康風險整合性應用軟體開發計畫，已完成上半年度研究工作，並如期提出期中成果報告，報告內容、已完成之工作項目及相關成果符合預定進度。 4. 期中成果報告所展現的全新 MUST 2.0 軟體已具備視覺化功能、操作友善性及多功能(基礎模式、現地模式)模式選項等強化提升成效，為後續計畫整體軟體開發工作建立良好基礎。 5. 本計畫研究團隊預計以3個月完成本案初步軟體開發工作，並交由專業環境工程顧問機構進行相關應用測試，藉此應可大幅提升本案軟體功能完整性與應用性。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 謝謝委員意見，目前已初步完整開發所有軟體預定的功能，後續會先提供給專業環境工程顧問機構進行相關應用測試，以提升本案軟體功能完整性與實務應用性。
委員三 5. 有依據計畫書內容及進度執行。 6. 國內場址實務上很難全部場址區域不採整治作為而僅用 MNA 結合健康風險管控，所以本計畫成果適合之運用區域與範圍探討評估(例如朝高濃度區積極整治或加強式生物分解搭配本計畫開發之 MNA 及健康風險) 7. 模擬軟體的率定很關鍵，影響健康風險計算結果之信賴度。國內已有許多含氯溶劑場址，建議將率定過程納入下半年度建立運用案例、使用者測試及撰寫使用者手冊工作內容中。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員意見，MNA 確實需配合其他污染源控制工作。 3. 謝謝委員意見，本計畫主要目的為軟體開發，以有限的時間加緊進度才能順利完成開發，我們會以國內的某一地下水污染場址作為軟體應用案例，對於率定的工作我們曾經在沒有介面時的 FORTRAN 軟體完成新竹某一污染場址的率定，然而基本上目前許多場址的調查資料的數量與頻率非常不足所以造成率定的信賴度仍可加強，我們團隊希望在後續的模場計畫找尋地下水污染場址進行監測井地下水水位長期觀測與污染物濃度的長期監測，並以我們所開發的軟體進行率定，以做為示範案例。
委員四 4. 本研究期中完成的工作內容如何?原定進度程式開發。 5. 後續加強模式測試，以及其他可應用資料庫的整合及應用相容性，仍待補充說明，因說明測試規劃與修正方案，預計測試應用於幾個實場，建議應包含至少三個實場，以實際的資料分析評估。 6. 建議應說明後續工作規劃與執行。	1. 本計畫依原進度順利完成個模組的開發，軟體名稱為 MUST 2，目前也由中央大學委託北美聯合專利商標事務所分別申請台灣與美國兩地發明專利，後續也將於2024年12月9日~12月13日舉行的全球25,000名專家學者，美國地球物理聯盟年會(American Geophysical Union Annual Meeting)的中央大學高等模式中心所設立的展覽攤位進行分享試用版分



	享，希望透過使用者意見回饋修正功能。 2. 目前已初步完整開發所有軟體預定的功能，後續會先提供給專業環境工程顧問機構進行相關應用測試，以提升本案軟體功能完整性與應用性，目前因時間關係有先以一實場案例進行測試。 3. 遵照辦理。
委員五 7. MNA 場址在國內實務應用上極為少見，環保機關一般較保守，後續建議朝較多污染場址採用的改善方法發展，以提升本計畫成果的實用性，較有利模式之推廣。 8. 建議提高操作友善性，例如濃度圖如能增加剖面視覺化圖像，實務上深度變化在改善上極為重要。 9. 土基會建置之「健康風險評估系統」已使用多年，請教本計畫預計建置之「健康風險評估模組」，在評估情境、限制、參數、運算方法、需自行輸入值、使用者操作等各方面與土基會系統有何異同、優勢？後續是否規劃搭配實場監測數據比較兩者評估結果，以作為未來風險評估工具發展精進之參考。 10. 現地應用模組介面設計部分，有許多需要使用者載入相關資料、設定參數的步驟，建議可以設計批次匯入、專案執行檔儲存、資料輸入的防呆機制、預設值或下拉選項等功能，避免錯誤或無效的資料輸入，影響模擬結果的判讀，幫助使用者正確地操作軟體。 11. 有關污染物降解常數、傳輸參數的率定，建議於成果報告中說明執行方式與率定結果。 12. 專案基本資料表請於定稿補上學校章。	1. MNA 在國際上為目前許多國家考慮的方向，但須配合適當的污染源控制措施，國內後續可篩選合適場址，做為示範場址進行地質、水文與化學調查或監測，並配合模式進行模式率定，確保污染遷移模擬與健康風險的信賴度，以進行公正的社會溝通，加速相關場址的解列。 2. 我們目前所開發的軟體稱為 MUST 2，是我們原本 MUST 軟體 (https://www.youtube.com/watch?v=38l_wtlvzX8) 的進階版，原本的 MUST 的軟體可進行三維的模擬與視覺化展示，MUST 2 除保留有原本的功能外，主要是強調 GIS 的智慧場址管理，所以具有地質、水文與化學資料的地理視覺化展示，方便模擬前資料的分析與可能情境的研判，以利於模擬前的理解，在進行模擬時，相關模擬工作可直接在地圖上執行且模擬結果可直接進行地圖疊圖，清楚展示污染團的地理位置，更有益於決策的執行與社會溝通。總體而言 MUST 進入頁面後，使用者可選擇基礎版或場址版，目前的採樣方式並沒有採用封塞於監測井中，以我的觀念並無法代表某特定深度的濃度，我會視為井水的平均濃度，所以在場址板就不考慮垂直深度的模擬。如果仍想進行垂直深度模擬，建議可採用基礎版，但基礎版無法直接在地圖上進行模擬。 3. 健康風險評估須以污染物遷移的解析解模式進行污染物濃度估算，如果土基會的健康風險評估系統沒有採用最新的多污染物共存遷移



的解析解模式，就無法針對含氯溶劑地下水污染場址進行貼近真實世界的濃度預測，一般來說通常會低估降解序列後端產物如 VC 的濃度，而且很自然就嚴重低估健康風險，也就是缺乏科學佐證下的模擬，不僅不具信賴度，而且在風險計算結果會受到高度挑戰。我們團隊在國際上含氯溶劑遷移的模擬在頂尖期刊發表超過 10 篇的解析解論文，而且能把解析解發展成商用軟體在全球推廣使用，為全球最頂尖的團隊，我們也分享相關軟體給美國德州農工大學詹紅兵講座教授最為課堂教學使用。我們非常樂意與目前土基會風險系統的開發團隊執進行模擬結果比較，在基於科研的基礎下釐清兩者間的差異。

4. 謝謝委員意見，目前已初步完整開發所有軟體預定的功能，後續會先提供給專業環境工程顧問機構進行相關應用測試，同時也會考慮委員所提出的非常有建設性的意見加強或修正功能以提升本案軟體功能完整性與應用性。
5. 謝謝委員意見，多污染物降解參數的率定須有一定的經驗，也唯有率定過的模擬結果才具有信賴度，多污染率定的過程相當複雜，也需要具有信賴度的場址地下水水位與污染物濃度的資料，在有這些資料下，每個團隊都可使用自己的模式發展自己的率定方法，確保模擬結果與真實觀測資料有最好的吻合。我們必須說明參數率定是一個專業的展現，本團隊率定的方法有獨特專業能力，過程中相當倚賴專業的污染物遷移學理的了解，不易以成果報告中說明執行方式與率定結果，因此無法在此報告中清楚說明，
6. 謝謝委員意見，遵照辦理。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

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

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：陳瑞昇 NO：R7	
計畫名稱	地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. MNA 是否應與現今之地下水現地整治技術(如：ISCO、SEV)需考慮影響半徑?若需考慮影響半徑，則 MNA 評估模組是否可評估? 2. 建議完成開發 MNA 評估模組後，可與地下水整治相關業者與專家評估實場應用可行性。 3. 附件 8-39，依本案研究經費編列內容，人事費用 950,000，已超過本計畫申請補助經費(1,200,000 元)之 50%，人事費用應以本計畫申請補助經費 50%為限，請修正。		1. 謝謝委員建設性意見，本計畫所發展的含氯溶劑 MNA 的解析解模式，類似美國環保署 BIOCHLOR 模式，但功能遠勝於 BIOCHLOR，但不能 ISCO 等其他現地整治技術，關於其他現地整治技術可以採用本計畫執行團隊過去執行環境部所開發的台灣環境署的地下環境模式平台 TWESMP 進行相關影響半徑的模擬評估。 2. 謝謝委員建設性意見，計畫執行團隊已與多家顧問公司接洽，希望能進行實場應用，但 MNA 雖無積極整治行為，但須進行型場址的地質、水文與化學資料的調查，才能發展場址概念模型，進行後續的 MNA 的評估。 3. 謝謝委員指正，本計畫主要工作是軟體開發，相關工作需要較多人力資源才能讓模式開發如期如質完成，因此人事費用會超過計畫申請補助經費的 50%比率已於檢送計畫申請書公文說明，相關事宜已於修正計畫書說明。	
委員二 1. 欲發展：(1)場址空間資訊分析資料庫與地理視覺化模組；(2)監測式自然衰減(MNA)評估模組與(3)健康風險評估模組，具實務應用性。模組預測結果的驗證機制為何？是否可依臺灣本土化地質條件等參數及現場實測污染物濃度數值作修正？		1. 謝謝委員對本計畫具實務應用性的肯定。模組預測的結果的正確性理論上要由現地的一段時間的觀測資料進行相關傳輸參數的率定，經率定完的傳輸參數可用來進行模擬，並與其他未使用來率定的結果作比較，確認模擬結果是否與現地觀測資料一致，以進一步確認預測結果的正確性，惟根據執行團隊曾經在台灣污染場址的模擬經驗，相關污染場址的地下水位觀測頻率並不高，常常無法掌握	



	地下水流場的季節性變化，因此也會影響模擬的信賴度。
委員三 - 主持人在此主題研究經驗豐富，開發之模式也具有實用性。 - 模式中的參數，也是模式成敗重要的依據，後續建議彙整說明如何取得合適參數的方法、甚至典型數值，以利模式之使用。 - 除了 MNA 模組外，如果同時有其他整治工法進行時，模式是否有能力評估？ - 國內含氯溶劑污染場址相當多，有些也已經有相當年分，建議能夠找尋合適場址，進行模式驗證，已確定模式合適性。	- 謝謝委員對本計畫模式具實務應用性的肯定。 - 謝謝委員建設性意見，模式參數理論上要由現地的一段時間的觀測資料進行相關傳輸參數的率定，經率定完的傳輸參數可用來進行模擬，並與其他未使用來率定的結果作比較，確認模擬結果是否與現地觀測資料一致，以進一步確認預測結果的正確性。本計畫也相彙整過去文獻中相關參數的過去文獻中的數值範圍，以便利使用者進行正確的參數選用。 - 謝謝委員建設性意見，本計畫所發展的含氯溶劑 MNA 的解析解模式，類似美國環保署 BIOCHLOR 模式，但功能遠勝於 BIOCHLOR，但不能進行其他整治工法的評估，關於其他現地整治工法可以採用本計畫執行團隊過去執行環境部計畫所開發的台灣環境署的地下環境模式平台 TWESMP 進行相關模擬評估
委員四 - 主持人近三年已發表 3 篇 SCI 期刊，代表成果研究在含氯有機溶劑地下水污染整治評估模式及多污染物傳輸解都有著墨。近三年主持人獲補助研究計畫 3 件，委辦計畫 1 件，足以勝任本專案研究計畫。又跨國跨校團隊在含氯溶劑 MNA 多污染物傳輸解析解模式發展獲得全球領先的重要研發成果，相關研發成果持續發表國際頂尖期刊。 - 執行團隊協同主持人受補助計畫 3 件，研究聚焦地下水含氯溶劑污染場址健康風險評估軟體及評估模式。又曾執行解析計算所撰寫的 Fortran 執行檔為基礎，發展互動式圖形使用者介面軟體可提供產官學研人員多元落地應用。 - 本計畫預估之成果績效貢獻包括學術產出國	- 謝謝委員肯定。 - 謝謝委員肯定。 - 謝謝委員建設性意見。 - 謝謝委員意見，已於修正計畫書說明。 - 謝謝委員意見，本計畫主要工作是軟體開發，相關工作需要較多人力資源才能讓模式開發如期如質完成，因此人事費用會超過計畫申請補助經費的 50%比率已於檢送計畫申請書公文說明，相關事宜已於修正計畫書說明。 - 謝謝委員意見。



外期刊、國內外研討會各一篇、技術、研究報告一篇人才培育研發人員 1 位、形成研究中心 1 個、發明專利 1 件及技術移轉衍生利益金 300 仟元等。 4. 本研究目的擬開發一套可以同時執行地下水含氯溶劑污染場址 MNA 與健康風險整合評估模擬軟體預期所獲成果與貢獻。研究方法步驟尚具體詳盡。惟建議補充預期所獲成果及貢獻。 5. 本計畫所編列人事費用費用偏高已超出編列標準(1~5 項相加之 50%為限)，建議調整經費。 6. 本研究主要是藉由於我們先進的多物種傳輸解析解模式的 FORTRAN 執行檔配備了互動式圖形使用者介面。建立健康風險評估模組，將先進多物種傳輸解析模式與健康風險模式結合，用於計算致癌和非致癌健康風險。	
委員五 1. 計畫書內容詳實。 2. 建議應考慮未來應用時所遇到的困難進行研究。 3. 本研究與前期計畫之差異為何。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員建設性意見，模式未來應用的成功主要取決於污染場址的地質、水文與化學資料的調查，如果相關資料越完整，應用成果會更具信賴度。 3. 前期計畫的計畫名稱為「地下水含氯溶劑污染場址健康風險評估軟體開發」，相關經費約 50 萬，計畫應屬先期計畫，主要是希望含氯溶劑多污染傳輸解析解模式所撰寫的 Fortran 執行檔為基礎，結合健康風險評估模組發展包括直覺式輸入介面與多元的模擬結果輸出的互動式圖形使用者介面軟體 MUST，本計畫執行團隊在有限經費仍努力完成相關健康風險評估軟體的開發，並榮獲環保署 111 年環境科技論壇暨成果發表會應用及推廣度優勝獎項。並帶來後續的多元推廣與落地應用，推廣包括(1)與國家高速網路與計算中心合作進行雲端軟體即服務(SaaS)；(2)技轉包括美商傑明工程顧問股份有限公司台灣分公司與業興環境環境科技股份有限公司，同時也接受鑫



	訓工程顧問公司邀請進行 MUST 使用教育訓練；(3)製作 MUST 介紹影片，於 2023/11/13 日上傳 YouTube 累達 3,000 觀看次數；(4)全球最大規模的美國地球物理聯盟展示區設立攤位(編號 1440)進行全球推廣，攤位人潮熱烈蒞臨，展現台灣在地下水污染傳輸模擬工具開發頂尖專業實力以提升台灣在國際的學術地位；(5)共同作者 Heejun Suk 博士在南韓首爾大學與印尼的 Center of Groundwater and Environmental Geology, Geological Agency, the Ministry of Energy and Mineral Resource 開設 MUST 使用教育訓練，並撰寫 MUST 簡介發表於南韓的 Newsletter of Korean Society of Soil and Groundwater Environment。 本期計畫的重點主要是新開發一個現地應用模組，便利使用者將所開發的模式應用於現地地下水污染場址的自然衰減與健康風險評估，在此模組會先新增場址資訊管理工具，使用者可輸入或匯入場址的地質、水文與化學資料方便資料的保存與後續查閱，也將提供鑽井岩心的三維空間視覺化展示，地下水等水位線與地下水流線，污染物濃度空間變化展示，相關結果可套疊地圖進行初步場址概念模型的建置以便利後續的模擬，使用者接續可直接在地圖上進行模擬範圍與受體位置的選定，模擬的結果也直接可套疊地圖進行地理視覺化展示，方便污染場址決策與後續行政管理工作，所有的現地應用過程都可由此新開發的軟體完成，無需使用其他付費工具。
委員六 1. 擬開發之軟體宜可應用於多個場址 CSM、MNA 及健康風險。 2. 國內有多個含氯溶劑場址，建議以真實場址來校正及率定檢核所開發軟體之 MNA。	1. 謝謝委員建設性意見。 2. 謝謝委員建設性意見，本計畫真實場址來校正及率定檢核所開發軟體之 MNA 為目標。
委員七 1. 健康風險評估模組在本土污染場址的各種情境，土地利用與人口分佈區域疏密程度不	1. 謝謝委員意見，本計畫的健康風險評估會以國內相關風險評估所需的平均調查直為輸



同，模式是否皆可適用或輔助 MNA 的可用性說明。	入，並未考慮相關情境或參數的不確定性。模式的適用性與輔助 MNA 的可用性本計畫也將借鏡參考美國環保署 BIOCHLOR 的應用案例。
委員八 - 計畫主持人及本計畫執行團隊的學術研究能力佳，足以勝任本計畫。主持人及本計畫執行團隊近五年的研究績效佳。 - 本計畫對國內土壤及地下水污染整治的推動有貢獻。 - 本計畫書撰寫具體完整，計畫書中已經說明本計畫的執行方式(本計畫的目標:為了降低整治費用與含氯溶劑污染物整治效益提升，達到撙節費用，妥善運用監測與整治資源)(本團隊已執行多年類似計畫，且已有成效，建議利用既有成果(以及國內已建構的風險資訊)更加精進)。 - 計畫書所述的構想具可行性，且具有實務應用潛力。 - 計畫執行期限合理，也已經說明預期的研究成果。	- 謝謝委員肯定。 - 謝謝委員肯定。 - 謝謝委員的建設性意見。 - 謝謝委員肯定。 - 謝謝委員肯定。
委員九 其他研究相關費:請補充說明本期計畫至臺北開會 14 趟之會議目的。	謝謝委員指正，本計畫至台北開會應修正為協同主持人由高雄任教學校至桃園中央大學進行軟體開發的每二週定期會議經費。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒構想書
 ☐申請計畫書
 ☐期中報告
 ☐修正計畫書
 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：陳瑞昇	NO：R17
計畫名稱	地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 4. 內文提及 MNA 其一缺點為增加整治時間，而本計畫執行期限為一年，應評估其可行性。		1. 謝謝委員意見，本計畫目標為開發可用於評估地下水含氯化溶劑污染場址的 MNA 和健康風險軟體，預計以一年的時間完成軟體的開發，軟體的測試則可以用現有污染場址過去長期的監測資料進行率定，獲得模式相關的傳輸參數資料，進一步評估 MNA 的可行性與健康風險的地理空間分布，可以進一步進行土地的分區管理。	
委員二 2. 欲發展：(1)場址空間資訊分析資料庫與地理視覺化模組；(2)監測式自然衰減(MNA)評估模組與(3)健康風險評估模組，具實務應用性。模組預測結果的驗證機制為何？是否可以現場實測污染物濃度數值作修正？		1. 謝謝委員肯定與意見，軟體的驗證則可以用現有污染場址過去長期的監測資料進行律定，獲得模式相關的參數資料，進一步評估 MNA 的可行性與健康風險的地理空間分布，可以進一步進行土地的分區管理。另外也可由率定後的模擬結果進行預測，進一步規劃應加強監測的地理空間位置。	
委員三 5. 本計畫係整合先有地下水模式與風險評估、以及視覺化模組，對於行政管理具有其應用價值。 6. 後續軟體若有開發商品化，建議能依相關規定適度回饋環境部應用。 7. 建議可以說明如何驗證其結果，例如與類似模式、或是實測資料相互比對？		1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定，後續軟體開發商品化，將依相關規定回饋環境部應用。 3. 軟體的解析解模式與目前最常用的 BIOCHHLOR 或 REMChlor 的比較已發表於團隊的相關期刊論文，因此驗證將以用現有污染場址過去長期的監測資料進行律定，獲得模式相關的參數資料，進一步評估 MNA 的可行性與健康風險的地理空間分布，可以進一步進行土地的分區管理。另外也可由率定後的模擬結果進行預測，進一步規劃應加強監測的地理空間位置。	



委員四 7. 附件 1-9，有關本計畫參考國際上 MNA 相關技術導則，發展 MNA 所需的地質、水文與化學資訊之場址空間資訊資料庫與地理視覺化模組，建議補充說明目前國外監測式自然衰減整治法應用情形，以利作為參考依據。 8. 附件 1-12，有關未來協助合作顧問公司應用於 MNA 可能地下水污染場址，由於並非所有的污染場址均適合採用 MNA 整治法，且 MNA 有其優缺點及使用限制，建議本計畫於未來執行時應將一併納入考量，以利評估未來實施可行性。 9. 有關本計畫之研究進度規劃，建議應檢具含工作項目、執行期間及查核點之甘特圖，以利相關單位瞭解其規劃內容。	1. 謝謝委員意見，本計畫除參考國際上 MNA 相關技術導則，發展 MNA 所需的地質、水文與化學資訊之場址空間資訊資料庫與地理視覺化模組，也將納入國外監測式自然衰減整治法應用情形，以作為參考依據。 2. 謝謝委員意見，本計畫目標為開發可用於評估地下水含氯化溶劑污染場址的 MNA 和健康風險軟體，預計以一年的時間完成軟體的開發，軟體的應用將以現有污染場址過去長期的監測資料進行律定，獲得模式相關的參數資料，進一步評估 MNA 的可行性與健康風險的地理空間分布，可以進一步進行土地的分區管理。 3. 謝謝委員意見，已於計畫書納入工作項目、執行期間及查核點之甘特圖，便利相關單位瞭解其規劃內容。
委員五 4. 軟體開發是否只針對厭氧脫率反應？ 5. 符合專案主題。	1. 軟體的解析解模式是以一階降解反應描述含氯溶劑的降解行為，這樣的數學表示式與常用的美國環保署的 BIOCHHLOR 或 REMChlor 一致，可以適用所有衰減性污染物如含氯溶劑的降解、放射性核種的衰變與氮氣的轉換，因此不限定於厭氧脫率反應所造成的降解。 2. 謝謝委員肯定。
委員六 3. 計畫書中說明：“本計畫乃為開發一套可以同時執行監測式自然衰減與健康風險整合評估的模擬軟體。本計畫是否會改進 BIOCHLOR 與 REMChlor 的缺點，該二模式將含氯溶劑原始污染物與降解生成產物的遲滯因子視為一致，此現象並不符合場址真實情形。” 4. 國內因為溫度與降雨等因子，除了人為積極介入之外，地下水環境不容易維持極低的 ORP，因此，NA(MANA)系統中最常見的是 DCE & VC 的累積，建議參考。也因為溫度較高之故，國外溫帶地區所引用的生物分解參數與國內情境不完全相同，也建議參考 5. 本計畫擬開發 MNA 評估模組，便利 MNA 實	1. 軟體的解析解模式可考慮氯溶劑原始污染物與降解生成產物的遲滯因子不同，並與目前最常用的 BIOCHHLOR 或 REMChlor 的比較，釐清 BIOCHHLOR 或 REMChlor 的可能誤差，相關成果已發表於團隊的相關期刊論文，團隊於此領域發表 10 篇頂尖期刊論文 (Chen et al., 2012a; 2012b; 2016; 2019a; 2019b; Liao et al., 2021, 2022; Suk et al., 2022; Chen et al., 2023; Nguyen et al., 2024)，也獲得相關文章的引用指出 BIOCHHLOR 的限制，團隊在含氯溶劑 MNA 多污染物傳輸解析解模式發展獲得全球領先的重要研發成果，為了方便實務工程人員執行解析解模式的計算，申請人團隊以執行解析解計算所撰寫的 Fortran 執行檔為基礎，發展互動式圖形使用者介面 (Graphical User Interface, GUI) 的軟體 MUST



務需求。國內已經有數場整治成功的 NA (部分 EN & NA) 的案例，建議以此類案例驗證本計畫的模式。 6. 本計畫也擬開發健康風險評估模組，便利健康風險評估、風險溝通與風險管理，國內含氣有機物污染場址執行 NA 後再採風險管理的案例極有限(台南永康會是較具體的案例)，本計畫的成果值得推廣。	(<u>MU</u>lti-<u>S</u>pecies transport analytical model)，MUS_t 介紹影片，於 2023/11/13 日上傳 YouTube (https://www.youtube.com/watch?v=38l_wtIvzX8)；短期一個多月累積近 2,000 觀看次數，遠遠多於其他學研機構的軟體影片觀看次數。 2. 謝謝委員意見，會納入考慮國內不同於國外的環境。 3. 謝謝委員意見，現有污染場址過去長期的監測資料進行率定驗證。 4. 謝謝委員意見與肯定，我們也將以台南永康作為健康風險評估的案例。
--	---



中文摘要

含氯溶劑地下水污染為全球非常重要的環境議題。含氯溶劑在低濃度下也被認為是致癌物和有毒物質。此類污染物很難整治，主要因為它們通常以重質非水相液體(DNAPL)的形式存在而外是到地下水。監測式自然衰減(MNA)指包括各種物理、化學或生物機制的自然衰減過程，在適當的條件下，無需人為的方式，可減少污染物的質量、毒性、遷移性、體積或濃度。在含氯溶劑污染場址，MNA 為有效方法，因為自然衰減過程會破壞和降解污染物。使用 MNA 的決策須有場址資料和分析支持。為了評估 MNA 含水層整治措施的有效性，需要有長期的監測計畫。MNA 的有效性在於要保護環境安全和公眾健康。數學模型廣泛應用於這些含氯溶劑污染場地。轉化產物的形成和降解對於含氯溶劑污染物傳輸非常重要。多物種傳輸解析解式以數學求解了一組由一系列一階降解反應耦合聯立移流-延散方程式，可同時合理地預測原始污染物及其生成產物的傳輸。在多物種傳輸解析解模式中，美國環保署所提供的 BIOCHLOR 和 REMChlor 是最常用的模式。基於健康風險的整治是管理污染場址的另一種方法。健康風險評估結合傳輸模式和健康風險評估工具來計算地下水污染對人類健康的影響。近年來，我們開發了幾個先進的多物種傳輸解析解模式發表於頂尖期刊。本計畫目標是開發一個軟體可用於評估地下水含氯化溶劑污染場址的 MNA 和健康風險。計畫完成三項重要工作。工項一開發場地管理模組，用於管理和空間繪製有關地質、水文和污染的場址資料以及建立概念場址模型(CSM)。工項二開發 MNA 評估模組，主要是藉由於我們先進的多物種傳輸解析解模式的 FORTRAN 執行檔配備了互動式圖形使用者介面 (GUI)。工項三建立健康風險評估模組，將我們的先進多物種傳輸解析解模式與健康風險模式結合，用於計算致癌和非致癌健康風險。新開發的軟體將為評估 MNA 和健康風險的有效工具。



英文摘要

Groundwater contamination by chlorinated solvents poses a significant environmental challenge worldwide, as these solvents are recognized carcinogens and toxicants, even at low concentrations. The remediation of such contamination is particularly difficult due to the presence of dense non-aqueous phase liquids (DNAPLs), which release chlorinated solvents into groundwater systems. Monitored Natural Attenuation (MNA) refers to the natural attenuation processes—encompassing physical, chemical, and biological mechanisms—that, under favorable conditions, act to reduce the mass, toxicity, mobility, volume, or concentration of contaminants without direct human intervention. For chlorinated solvent-contaminated sites, MNA is most effective when the natural processes facilitate the degradation and destruction of contaminants. The decision to implement MNA as a remediation strategy is supported by site-specific data and detailed analysis of contaminant behavior, necessitating long-term monitoring to evaluate the approach's efficacy. Moreover, for MNA to be a viable strategy, it must ensure the protection of environmental safety and public health.

Mathematical models play a crucial role in assessing the fate and transport of chlorinated solvents at contaminated sites. The formation and degradation of transformation products are key factors in contaminant transport processes. Multispecies transport analytical models, which solve simultaneous advection-dispersion equations coupled with first-order degradation reactions, have been developed to predict the transport of both the parent compounds and their daughter products. Among these, BIOCHLOR and REMChlor, developed by the USEPA, are commonly used for such assessments. In recent years, health risk-based remediation has emerged as an alternative approach to site management, integrating transport models with health risk assessment tools to evaluate the potential human health impacts of groundwater contamination.

Building on this foundation, we have developed advanced multispecies transport analytical models, which have been published in leading scientific journals. This project aims to develop a comprehensive software package for the assessment of MNA and health risk at chlorinated solvent-contaminated groundwater sites. The project involves three key tasks: (1) the development of a site management module for managing and spatially mapping site-specific data related to geology, hydrology, contamination, and the conceptual site model (CSM); (2) the creation of an MNA assessment module that integrates our advanced multispecies transport analytical models into a user-friendly



Graphical User Interface (GUI), utilizing FORTRAN executable files; and (3) the construction of a health risk assessment module that combines our multispecies transport models with health risk models to calculate both carcinogenic and non-carcinogenic health risks. The resulting software package offers an effective and comprehensive tool for the assessment of MNA and associated health risks at contaminated sites.



目次

一、前言 1

二、研究方法與過程 8

三、結果與討論 16

四、結論 31

五、參考文獻 32



圖次

圖 1 跨國跨校研發團隊成員。.....	3
圖 2 MUST 的直覺式輸入介面。.....	3
圖 3 MUST 輸出介面，個別污染物的濃度穿透曲線或所有污染物繪製一起的濃度穿透曲線。.....	4
圖 4 美國地球物理聯盟 2023 AGU Annual Meeting 剪影。.....	4
圖 5 MUST 簡介發表於韓國土壤與地下水協會簡訊(Newsletter of Korean Society of Soil and Groundwater Environment)。.....	5
圖 6 含氯有機溶劑 PCE 的分歧型生物降解反應途徑。.....	6
圖 7 健康風險評估模組發展的概念與流程。.....	7
圖 8 MUST 2 的進入頁面設計，此處包含兩個選項：「基礎模式」與「現地模式」。.....	19
圖 9 MUST2 場址模組流程圖。.....	19
圖 10 進入現地模式後頁面左邊的相關選項，首先可選擇「site」載入場址相關資訊。.....	20
圖 11 由資料匣載入.shp 檔案。.....	20
圖 12 載入邊界的.shp 檔案，在頁面右邊展示邊界的地理視覺如藍線。.....	21
圖 13 載入監測井地理空間相關資料，右邊也會進行監測井位置的地理視覺化展示。.....	21
圖 14 岩心三維地理視覺化展示。.....	22
圖 15 使用者可選擇左邊的「Hydrology」，載入地下水水位相關資訊。.....	22
圖 16 監測井的地下水水位的地理視覺化展示，其中不同顏色代表不同的地下水水位高度。.....	23
圖 17 點選「Generate flow field」可以呈現等水位線，同時也可以產生地下水流向，展示場址的地下水流場。.....	23



- 圖 18 同時也可以計算平均地下水流速。 24
- 圖 19 選擇左邊的「Chemistry」可以在入監測井濃度資料，同時頁面右邊可以展示濃度的地理視覺化。 24
- 圖 20 選擇左邊的「Site conceptual model integration」，並點選頁面上方的「Domain」選項可以設定模擬的維度與範圍。 25
- 圖 21 在「Source history」提供「Constant」、「Exponential」與「Build manually」三種選項設定污染源濃度隨時間變化。同時右邊會顯示對應的污染源濃度隨時間的變化。 25
- 圖 22 選擇「Transport」可設定模擬相關資訊，選擇「Hydrogeology」可以依序輸入水力傳導係數「Hydraulic conductivity」、水力梯度「Hydraulic gradient」與有效孔隙率「Effective porosity」。選擇延散「Dispersion」可以設定縱向延散係數「Longitudinal dispersion」與側向延散係數「Transverse dispersion」。 26
- 圖 23 選擇「Reaction」可以設定每一個污染物的降解常數「Decay reaction」、前後代污染物的質量轉換常數「Yield coefficient」與個別污染物的遲滯因子「Retardation factor」。 26
- 圖 24 選擇「Risk Assessment」可設定暴露參數「exposure parameter」與不同污染物的毒性資料「Toxicological data」進行健康風險評估參數設定。 27
- 圖 25 在頁面左邊的「Output」可設定模擬結果的輸出，在「Options」可以選擇不同的輸出方式，下方的「Settings」可設定模擬的範圍，右邊的上方選項停留在「Concentration」會視覺化展示模擬結果輸出。 27
- 圖 26 在右上方選擇「Data value」可以顯示模擬結果數值輸出。 28
- 圖 27 在右上方選擇「Risk」可以顯示風險視覺化的計算結果。 28
- 圖 28 選擇「Concentration profile along x direction」會展示濃度隨距離的變化。 29
- 圖 29 在右上方選擇「Risk」可以顯示風險視覺化的計算結果。 29



圖 30 選擇「Concentration contour on map」可將模擬結果套疊地圖進行地理視覺畫展示。	30
---	----



一、前言

含氯溶劑(chlorinated solvents)為地下水常發現的污染物，在地下水污染場址常見的含氯溶劑污染物包括四氯乙烯(perchloroethene 或 tetrachloroethene, PCE)、三氯乙烯(trichloroethene, TCE)、1,1,1-三氯乙烷(1,1,1-trichloroethane, 1,1,1-TCA)等。國內公告的地下水含氯溶劑列管場址共 130 處(工廠類 86 處)，整治場址 55 處、控制場址 48 處(統計至 2023 年 11 月 13 日)，因此地下水含氯溶劑污染場址的管理是十分重要的工作。

含氯溶劑普遍使用於工業界，含氯溶劑為重質非水相液體(dense non-aqueous phase liquid, DNAPL)，DNAPL 比水重而且僅微溶於水，DNAPL 以不溶於地下水的分離液體相移動至含水層一定深度，DNAPL 微溶進入地下水，微溶於地下水的含氯溶劑會隨地下水流動而遷移形成溶解相污染團(dissolved plume)。各種污染整治技術可應用於含氯溶劑溶解相污染團的整治，相較於 DNAPL 污染源區整治，含氯溶劑溶解相污染團整治相對容易且所需花費成本較低，污染場址的含氯溶劑 DNAPL 不會因為溶解相污染團整治而快速消耗質量。當可觀的含氯溶劑 DNAPL 污染源存在時，只進行溶解相污染團整治會因為 DNAPL 污染源不斷外釋，而不易達到將溶解相的含氯溶劑濃度降低至符合水質標準的整治目標。

監測式自然衰減(monitored natural attenuation, MNA)為藉由地下水的自然過程，減低污染物濃度或質量，MNA 為現地整治技術，MNA 潛在優點為減少廢棄物產生與節約能源使用，缺點則是與其他的主動式整治技術比較，將增加整治的時間。MNA 可作為地下水污染場址整體整治策略的可能構成要素，近年來，隨著科學知識與對 MNA 過程更深入了解，應用 MNA 作為地下水污染整治措施也日益增加。地下水污染整治措施最重要是必須能夠保護公眾健康、安全與環境，同時也要能達到場址特定的整治目標，MNA 可以結合其他整治技術進行整體評估，以確認 MNA 是否可作為現地整治的適當構成要素，執行 MNA 整治，需要足夠的地下水污染場址特徵資料調查與分析來證明自然衰減正在發生。

採用 MNA 通常需要地下水污染場址特徵資料與相關分析支持場址的管理決策，相關分析需要藉由以 MNA 做為整治重點的場址特徵調查與分析所發展出的概念場址模式(conceptual site model, CSM)，了解水文地質與地下水污染物的空間分布為場址特徵分析的關鍵因素，地下水污染場址特徵資料調查與分析所建立的 CSM 在 MNA 可行性評估將扮演重要角色，CSM 主要是建立污染物由污染來源區外釋經由環境介質與暴露途徑而最後到達受體過程的模型。由於場址地層異質性(heterogeneity)，因此水文地質過程變得非常複雜，進行小尺度細密調查了解



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

整個地下水污染場址的污染物分布與傳輸型式在實務上並不可行。從工程實務的觀點，分析的目標精度應該是足以了解地表下污染物的遷移過程，發展 CSM 要依序從地質、水文與化學三個主要資訊調查，地質調查要先確定地下水可以流動的地層，水文則探討在可流動地層中地下水的遷移快慢，化學則是在流動的地下水文系統中污染物隨著地下水的傳輸(溶解相)、污染物降解、和溶解相污染物與地層固體顆粒的化學和物理交互作用。

許多模式軟體可應用於 MNA 的評估，在許多情況下解析解模式工具可以用來率定污染場址觀測的濃度資料，並估算溶解相污染團未來的可能遷移發展，由於含氯溶劑自然衰減通常會伴隨降解產物的產生，因此解析解模式工具需時能同時考慮含氯溶劑原始污染物與降解生成產物共存於含水層的遷移(又稱為多污染物傳輸解析解模式)。美國環保署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)的 **BIOCHLOR** (Aziz et al. 2000)與 **REMChlor** (Falta et al. 2007) 可同時模擬含氯溶劑原始污染物與降解生成產物共存於含水層的遷移。根據 McGuire et al. (2004)分析 191 個污染場址與 45 個含氯溶劑溶解相污染團的 MNA，發現除統計方法外，60%的污染團採用數學模式進行分析，其中使用最多的是 BIOCHLOR (Aziz et al., 2000)模式。

申請人的跨國跨校團隊(圖 1)在含氯溶劑 MNA 多污染物傳輸解析解模式發展獲得全球領先的重要研發成果，相關研發成果持續發表國際頂尖期刊 (Chen et al., 2012a; 2012b; 2016; 2019a; 2019b; Liao et al., 2021, 2022; Suk et al., 2022; Chen et al., 2023; Nguyen et al., 2023)，為了方便實務工程人員執行解析解模式的計算，申請人團隊以執行解析解計算所撰寫的 Fortran 執行檔為基礎，發展互動式圖形使用者介面 (Graphical User Interface, GUI) 的軟體 **MUST** (**M**ulti-**S**pecies **t**ransport **a**nalytical **m**odel) (https://www.youtube.com/watch?v=38l_wtIvzX8)，可提供產官學研人員多元落地應用，**MUST** 包括直覺式輸入介面(圖 2)與多元的模擬結果輸出(圖 3)。**MUST** 獲得中央大學智財委員會技術轉移授權同意。目前相關推廣包括(1)與國家高速網路與技中心合作進行雲端軟體即服務(SaaS)；(2)技轉多家顧問公司；(3)架設網路平台進行全球商品化銷售(<https://camrdaproducts.ncu.edu.tw/products-landing/must/>)；(4)製作 **MUST** 介紹影片，於 2023/11/13 日上傳 YouTube (https://www.youtube.com/watch?v=38l_wtIvzX8)；，短期一個多月累積近 3,200 觀看次數，遠遠多於其他學研機構的軟體影片觀看次數；(5)美國地球物理聯盟 (American Geophysical Union, AGU) 2023 AGU Annual Meeting 展示區設立攤位 (編號 1440)進行全球推廣，攤位人潮熱烈蒞臨(圖 4)，也獲得許多美國大學教授



一、前言

詢問應用教學研究的優惠價格方案，展現台灣在地下水污染傳輸模擬工具頂尖專業實力以提升台灣在國際的學術地位；(6)Heejun Suk 博士在南韓首爾大學開設 MUST 使用教育訓練，並撰寫 **MUST** 簡介發表於 Newsletter of Korean Society of Soil and Groundwater Environment (圖 5)。



圖 1 跨國跨校研發團隊成員。

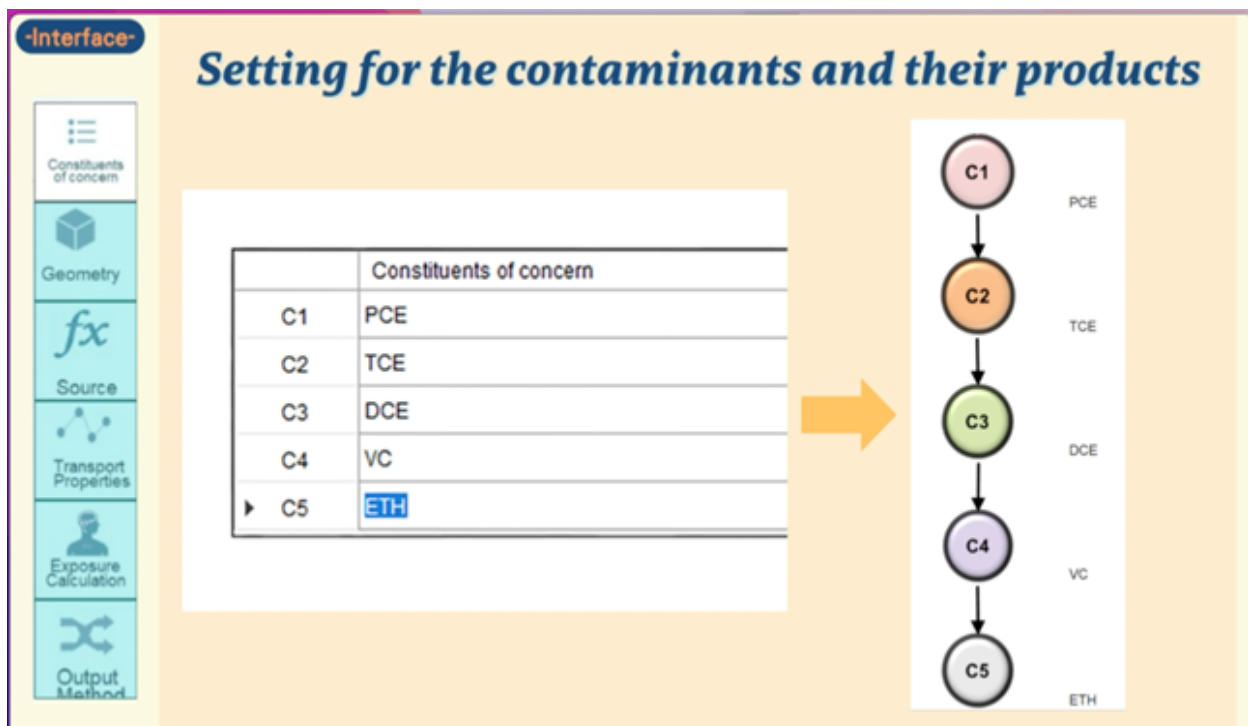


圖 2 MUST 的直覺式輸入介面。



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

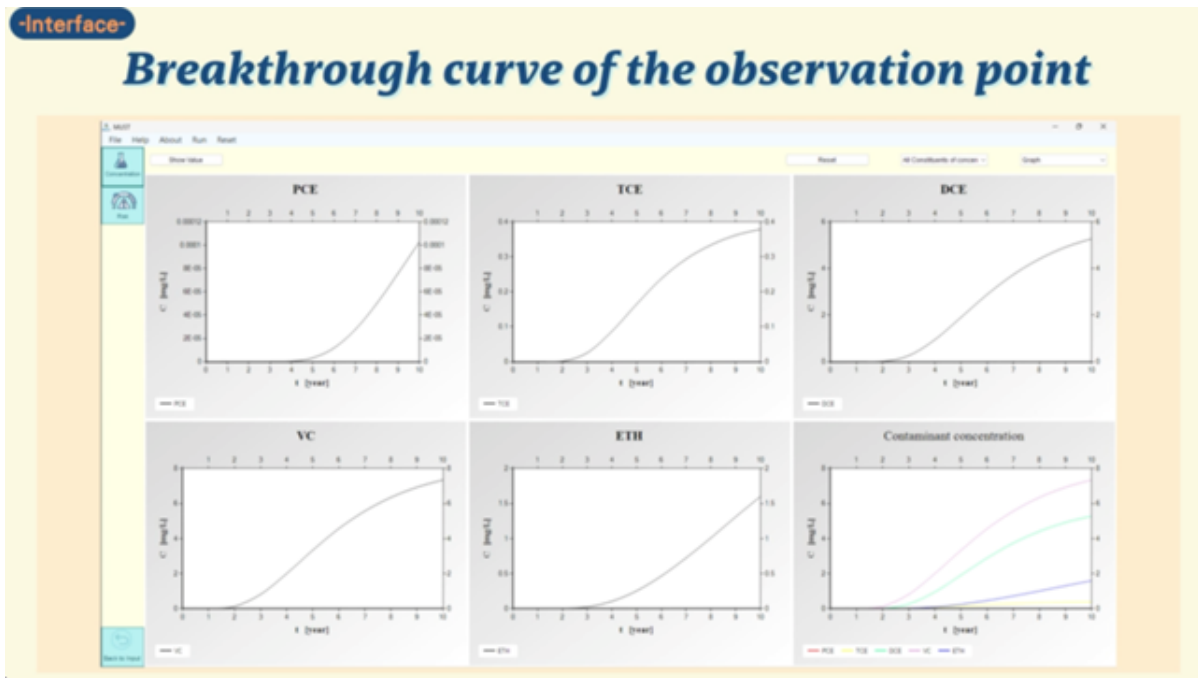


圖 3 MUST 輸出介面，個別污染物的濃度穿透曲線或所有污染物繪製一起的濃度穿透曲線。



圖 4 美國地球物理聯盟 2023 AGU Annual Meeting 剪影。



一、前言



圖 5 MUST 簡介發表於韓國土壤與地下水協會簡訊(Newspletter of Korean Society of Soil and Groundwater Environment)。

由於 MNA 整治措施最重要的是必須能保護公眾健康，健康風險評估以(A)危害鑑定(Hazard Identification)；(B)劑量反應評估(Dose Response Assessment)；(C)暴露評估(Exposure Assessment)與(D)風險特徵描述(Risk Characterization)為四個基本架構。其中暴露評估為探討關切污染物(contaminant of concern, COC)經由各種暴露途徑進入人體的可能性，須以危害鑑定所得的場址概念模型中的暴露途徑與場址的水文地質特性選擇適宜的地下水傳輸模式來估計 COC 於環境介質的流布的情形及 COC 最後與受體接觸時的濃度，再以此 COC 濃度與暴露因子計算各種暴露途徑受體吸收 COC 的劑量(稱為暴露劑量)。風險特徵描述則是綜合前述三個步驟進行綜合性評估，以估計污染物影響人體健康的風險程度高低與影響方式，並依此擬定風險管理策略。



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

如圖 6 所示，PCE 在還原脫氯反應過程，碳原子鍵結的氯離子會被氫離子取代，降解為 TCE，再轉變而形成 1,1-DCE、cis -1,2- DCE 與 trans -1,2- DCE 等三種同分異構物(isomer)，所形成的三種同分異構物的 DCE 再繼續進行脫氯反應，依次形成 VC 和 ETH。根據相關資料顯示美國 54%的場址有 PCE、54%的場址有 TCE、36%的場址有 1,1-DCE、10%的場址有 cis -1,2- DCE、39%的場址有 trans -1,2- DCE、37%的場址有 VC (Griffin et al., 2004)。

申請人團隊過去雖已開發出 **MUST**，所考慮的解析解模式只考慮 DCE，並未考慮 DCE 的三個同分異構物(1,1-DCE、cis -1,2- DCE 與 trans -1,2- DCE)。申請人團隊最開發出更貼近真實現況可考慮 DCE 的三個同分異構物的分歧式降解反應解析解模式(廖，2023)。

因此本研究的目的為開發一套可以同時執行監測式自然衰減與健康風險整合評估的模擬軟體。此全新的本土評估軟體的特色為：

- (1) 參考國際上 MNA 相關技術導則，發展 MNA 所需的地質、水文與化學資訊的場址空間資訊資料庫與地理視覺化模組
- (2) 以考慮時變性污染源與分歧式降解反應的三維含氯污染物與降解產物共存的污染傳輸解析解模式作為核心的具圖形使用者介面 MNA 評估模組
- (3) 結合三維含氯污染物與降解產物共存的傳輸解析解模式，作為健康風險評估暴露量計算基礎，開發含氯溶劑地下水污染健康風險評估計算模組(圖 7)，便利的含氯溶劑地下水污染健康風險評估、風險溝通與風險管理。

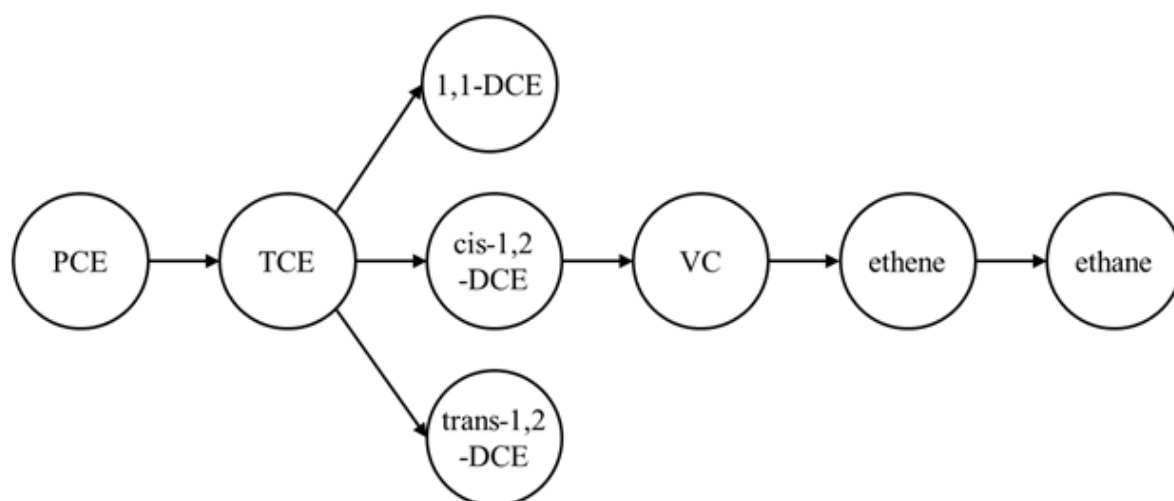


圖 6 含氯有機溶劑 PCE 的分歧型生物降解反應途徑。



一、前言

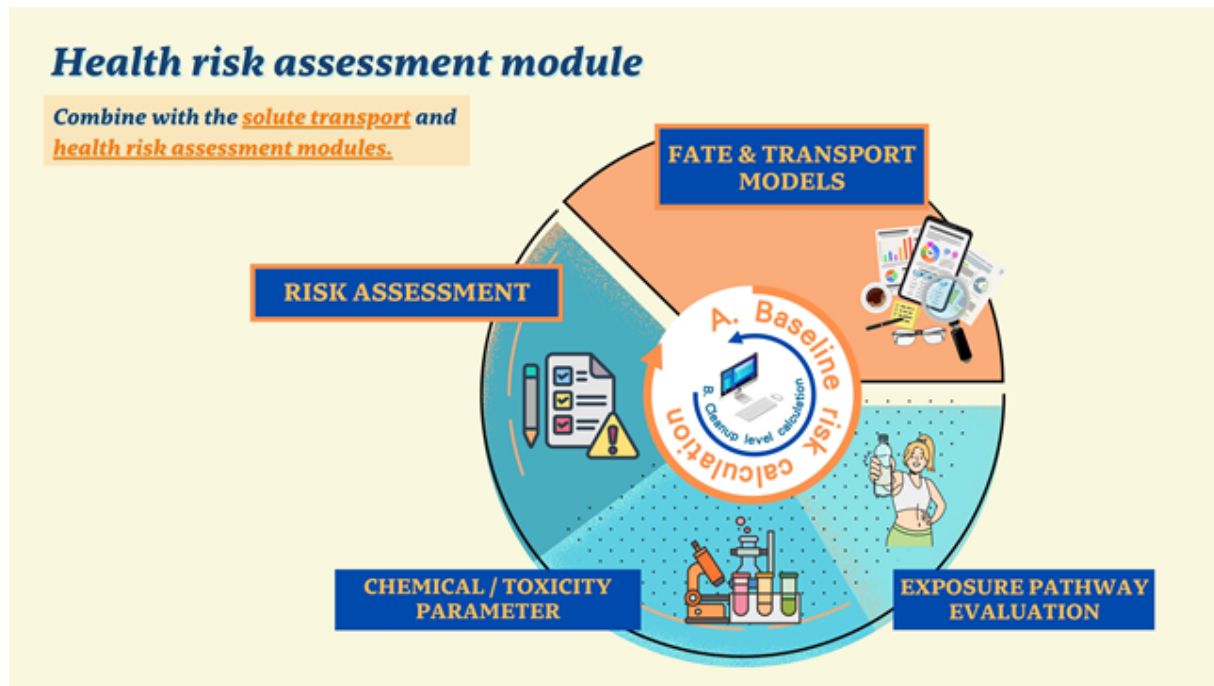


圖 7 健康風險評估模組發展的概念與流程。



二、研究方法與過程

本研究目的為開發一套可以同時執行地下水含氯溶劑污染場址 MNA 與健康風險整合評估模擬軟體，將包括三個次模組：(1)場址空間資訊分析資料庫與地理視覺化模組；(2)MNA 評估模組；與(3)健康風險評估模組，以下就三個次模組的方法進行說明。

(1)場址空間資訊資料庫與地理視覺化模組

在進行 MNA 評估前，須進行地下水污染場址的地質、水文與水質調查，經過調查後可能取得多口監測井的地質鑽探岩心(不同粒徑地質材料組成)資訊、多口監測井地下水位(水頭)資訊與多口監測井地下水水質(不同污染物濃度)資訊，這些資料的空間內插分析與地理視覺化展示可便利污染場址管理與整治決策分析。過去空間內插分析與地理視覺化展示都需藉由不同收費昂貴的不同商業軟體來進行，另外 MNA 通常需要較長的時間，資料庫系統的建立對於資料的保存且能不受人員異動而影響資料的完整性。本計畫在地質資訊使用者依所取得的岩心資料，考慮鑽孔的空間位置、鑽孔高程、不同地質材料分布深度下展示三維的水文地質柱狀圖。在水文資訊，使用者依所取得的監測井地下水位資料，考慮監測井的空間位置、監測井的井頂高程下展示二維的地下水水位等值圖，並在這些地下水水位等值圖的基礎下自動產生地下水流方向。在水質資訊方面，使用者可依所取得的監測井地下水污染物濃度資料，以不同顏色展示污染物濃度高低，另外也可展示二維的污染物濃度等值圖，這些地下水污染物濃度等值圖也可套疊水文資訊的地下水流向，進一步了解污染物在污染場址的可能遷移方向。場址空間資訊資料庫與地理視覺化模組可便利資料查詢、下載功能與整合視覺化展式，完整保留調查成果，以便利進行地質、水文與化學時空分布的相關性分析。

(2)MNA 評估模組

MNA 通常需要適當的地下水污染傳輸模式，就如前述申請人團隊在含氯溶劑 MNA 多污染物傳輸解析模式發展最近又有突破性研究成果，在國際上居於最領先地位，但模式的計算程式是以 Fortran 程式語言撰寫，對一般實務工程人員並不容易執行 MNA 評估，為方便使用者進行相關評估。本計畫將以廖(2023)解析解模式 Fortran 程式發展出互動式圖形使用者介面的軟體，友善的互動式圖形使用者，在視覺上更易於接受且方便執行相關計算的輸入，且執行後的結果能立刻多元化視覺化展示，模擬的結果也能套疊地圖，方便地理視覺化展示與進一步決策分析與管理。



二、研究方法與過程

廖(2023)解析解模式主要考慮的含氯溶劑污染物在地下水的傳輸機制為移流(advection)、延散(dispersion)、吸附(sorption)和生物降解(biodegradation)等四個過程。移流傳輸為污染物隨著平均地下水滲流(seepage velocity)的遷移，平均地下水流量的計算是根據 Darcy 定律，延散傳輸假設遵循 Fick 定律，吸附假設為平衡線性等溫吸附(equilibrium linear isotherm sorption)，並使用遲滯因子(retardation factor)來描述，生物降解為微生物轉化污染物轉化為另一種污染物(或成為對環境無害的物質)，一般假設生物降解遵循一階反應。廖(2023)考慮 DCE 的三個同分異構物(1,1-DCE、cis-1,2-DCE 與 trans -1,2- DCE)，因此不像 BIOCHLOR 只考慮 5 個互相耦合移流-延散方程式描述 PCE、TCE、DEC、VC 與 ETH 等 5 個污染物的傳輸行為，而以 7 個互相耦合移流-延散方程式描述 PCE、TCE、1,1-DCE、cis-1,2-DCE、trans -1,2- DCE、VC 與 ETH 等 7 個污染物的傳輸行為。BIOCHLOR 的 5 個污染物移流-延散的偏微分方程式(partial differential equation，簡稱 PDE)雖然為互相耦合，但其耦合方式相對較為簡單，也就是對每一子污染物只受到前一代的單一污染物影響。然而在廖(2023)解析解模求解的互相耦合的 7 個移流-延散偏微分方程式其耦合的方式將變得較為複雜，以污染物 VC 來說，必須考慮 6 來自 1,1-DCE、cis-1,2-DCE、trans -1,2- DCE 等 3 個污染物的貢獻。根據上述假設，考慮如圖所示分歧型式的生物降解反應路徑的含氯溶劑地下水污染物傳輸，假設區域地下水沿正 x 軸方向流動、穩態且均勻流動，因此移流為沿著 x 方向一維傳輸，而延散則為沿著 x 、 y 與 z 方向三維傳輸，其 7 個污染物的移流-延散偏微分方程式的數學表示為：

$$R_1 \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C_1(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_1(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_1(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_1(x, y, z, t)}{\partial x} - k_1 C_1(x, y, z, t) \quad (1)$$

$$R_2 \frac{\partial C_2(x, y, z, t)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C_2(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_2(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_2(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_2(x, y, z, t)}{\partial x} - k_2 C_2(x, y, z, t) + g_{P \rightarrow T} k_1 C_1(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$R_3 \frac{\partial C_3(x, y, z, t)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C_3(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_3(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_3(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_3(x, y, z, t)}{\partial x} - k_3 C_3(x, y, z, t) + g_{T \rightarrow D} f_{23} k_2 C_2(x, y, z, t) \quad (3)$$



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

$$R_4 \frac{\partial C_4(x, y, z, t)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C_4(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_4(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_4(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_4(x, y, z, t)}{\partial x} - k_4 C_4(x, y, z, t) + g_{T \rightarrow D} f_{24} k_2 C_2(x, y, z, t) \quad (4)$$

$$R_5 \frac{\partial C_5(x, y, z, t)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C_5(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_5(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_5(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_5(x, y, z, t)}{\partial x} - k_5 C_5(x, y, z, t) + g_{T \rightarrow D} f_{25} k_2 C_2(x, y, z, t) \quad (5)$$

$$R_6 \frac{\partial C_6(x, y, z, t)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C_6(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_6(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_6(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_6(x, y, z, t)}{\partial x} - k_6 C_6(x, y, z, t) + g_{D \rightarrow V} k_3 C_3(x, y, z, t) + g_{D \rightarrow V} k_4 C_4(x, y, z, t) + g_{D \rightarrow V} k_5 C_5(x, y, z, t) \quad (6)$$

$$R_7 \frac{\partial C_7(x, y, z, t)}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C_7(x, y, z, t)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_7(x, y, z, t)}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C_7(x, y, z, t)}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_7(x, y, z, t)}{\partial x} - k_7 C_7(x, y, z, t) + g_{V \rightarrow E} k_7 C_7(x, y, z, t) \quad (7)$$

此處 $C_1(x, y, z, t)$ 為 PCE 溶解相濃度[mg/L]； $C_2(x, y, z, t)$ 為 TCE 溶解相濃度[mg/L]； $C_3(x, y, z, t)$ 為 1,1-DCE 溶解相濃度[mg/L]； $C_4(x, y, z, t)$ 為 cis-1,2-DCE 於溶解相濃度[mg/L]； $C_4(x, y, z, t)$ 為 trans -1,2- DCE 溶解相濃度[mg/L]； $C_6(x, y, z, t)$ 為 VC 溶解相濃度[mg/L]； $C_7(x, y, z, t)$ 為 ETH 溶解相濃度[mg/L]； $g_{P \rightarrow T}$ 為由 PCE 降解為 TCE 的生成質量產生轉換因子； $g_{T \rightarrow D}$ 為由 TCE 降解為 DCE 的三個同分異構物的生成質量產生轉換因子； $g_{D \rightarrow V}$ 為由 DCE 的三個同分異構物降解為 VC 的生成質量產生轉換因子； $g_{V \rightarrow E}$ 為由 VC 降解為 ETH 的生成質量產生轉換因子； f_{23} 為由 TCE 降解為 1,1-DCE 的百分比(fraction)； f_{24} 為由 TCE 降解為 cis-1,2-DCE 的百分比； f_{25} 為由 TCE 降解為 trans-1,2-DCE 的百分比； D_x 為沿水流方向的縱向(longitudinal)延散係數[m²/yr]； D_y 與 D_z 為沿 y 方向與 z 方向之側向(transverse)延散係數； v 為平均滲流速度； k_i 為第 i 個物種之一階衰變反應速率常數； v 為平均滲流速度； x 、 y 、 z 為空間座標； t 為時間。



(3)健康風險評估模組

為了解含氯溶劑污染物經由各種途徑進入人體的機會，須以 CSM 的暴露途徑與場址的水文地質特性選擇適宜的多污染物傳輸模式估計含氯污染物於環境介質的流布情形以及最後與受體接觸時的濃度，再以此濃度與暴露因子計算各種暴露途徑的受體吸收含氯溶劑的暴露劑量。本研究將依圖 7 所示的流程開發健康風險評估模組，採用的多污染物傳輸此健康風險評估模組將包括最先進的多污染物解析模式(廖，2023)、暴露因子、化學毒性資料庫與致癌/非致癌風險計算。

健康風險評估著重量化因長期暴露地下水含氯溶劑而導致的致癌風險與非致癌風險，人體對受污染地下水的主要暴露途徑為取用井內地下水做為飲用水，另外地下水污染物除了經由飲用地下水直接攝取外，如果是揮發性污染物，則可能從水中逸散至居家的空氣中而吸入人體內，吸入致癌風險與攝食致癌風險相比可能一樣大或更大。美國國家科學院提出的風險推估量的表現方式主要分為致癌風險與非致癌風險兩種方式。

a.致癌風險估算：

含氯溶劑污染物與其降解生成產物中 PCE、TCE 與 VC 被認為具致癌或可能致癌，致癌風險以目標風險(target risk, TR)機率值表示，代表增加罹患癌症機率，以 10^{-6} 為較嚴格參考標準，指在一百萬人中可能增加 1 人罹患癌症機率，暴露於致癌污染物標的風險可以致癌物的慢性每日攝食量(chronic daily intake, CDI)與致癌風險斜率因子(cancer risk slope factor, SF)量化，慢性每日攝食量(CDI)又稱為終身平均每日劑量(lifetime average daily dose, LADD)，表示考慮暴露期間人體壽命平均劑量率。致癌風險斜率因子也稱為致癌效力因子(cancer potency factor, CPF)，致癌斜率因子為由經由攝食或呼吸暴露於一個特定介質增加的致癌風險的上限(近似 95%的信賴區間)，一般最大暴露期間(t_{ex})通常限制為 30 年，目標風險(TR)以下式計算：

$$TR = 1 - \exp(-LADD \times SF) \quad (8)$$

指數函數可以冪級數表示為

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots \quad (9)$$

在較微小劑量下，忽略式(9)的高階項($n \geq 2$)下，方程式(8)中的右邊第二項



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

的指數函數可以近似為

$$\exp(-LADD \times SF) = 1 - LADD \times SF \quad (10)$$

方程式(10)代入方程式(8)，整理可得

$$R = LADD \times SF \quad (11)$$

經由攝食劑量 $LADD_{oral-water}$ 計算是以井內地下水污染物濃度(mg/L)計算，其計算公式為

$$\begin{aligned} & LADD_{oral-water} \\ &= \\ & C_{water} \times \\ & \left(\frac{IR_{oral-water-adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} + \right. \\ & \left. \frac{IR_{oral-water-child} \times ED_{child}}{BW_{child}} \right) \times \\ & \frac{EF}{AT} \end{aligned} \quad (12)$$

此處 C_{water} 為地下水關切污染物濃度[mg/L]； $IR_{oral-water-adult}$ 為成人飲水率 [L/day]； $IR_{oral-water-child}$ 為孩童飲水率[L/day]； ED_{adult} 為成人暴露期間，暴露總年數[year]； ED_{child} 為孩童暴露期間，暴露的總年數[year]； BW_{adult} 為成人體重 [kg]； BW_{child} 為孩童體重[kg]； EF 為暴露頻率，一年中暴露天數[day/year]； AT 為暴露發生的平均時間[day]。井內的地下水污染物濃度常無法直接量測，因此以廖(2023)傳輸解析模式估計受關切污染物由污染源經地下水傳輸移動至受體所在的濃度。

攝食地下水目標風險($TR_{oral-water}$)可利用下式計算

$$TR_{oral-water} = LADD_{oral-water} \times SF_{oral} \quad (13)$$

此處 SF_{oral} 為攝食致癌斜率因子(oral cancer slop factor)。



二、研究方法與過程

除了攝食風險外，家戶地下水使用也可能產生室內空氣中的致癌物濃度，也可能引起吸入致癌物的暴露，其計算概念與攝食地下水目標風險類似。所以考慮飲用與吸入地下水污染物的致癌目標風險為

$$R = R_{oral-water} + R_{inh} \quad (14)$$

由於含氯污染物場址包含 PCE、TCE 與 VC 多個致癌污染物共存，在毒理學上若人體同時吸收兩種以上化學物質，因為多個化學物質對人體作用，人體對多個化學物質間的反應可能是相加性(additive)、相乘性(synergic)、拮抗性(antagonistic)與增強作用(potentiation)。由於目前對於多污染物對人體反應的資料不足，因此總目標風險是以簡單的個別污染物的目標風險累加計算如下式：

$$TR_T = \sum_{i=1}^N TR_i \quad (15)$$

此處 TR_T 為全部污染物的總標的風險； TR_i 為第 i 個致癌物的標的風險； N 為致癌污染物總數目。本計畫以美國環保署的整合風險資訊系統(Integration Risk Information System, IRIS)為斜率因子的參考依據。

b. 非致癌風險估算：

在非致癌風險計算以非致癌風險危害商數(hazard quotient)評估環境有害物質所導致人體非致癌健康風險，危害商數代表發生癌症以外疾病的可能性，是將終身平均每日攝入量除以參考劑量 (reference oral dose)，危害商數計算公式為

$$HQ = \frac{LADD}{RfD} \quad (16)$$

此處 HQ 為危害商數， RfD 為參考劑量。

攝食地下水污染物的危害商數 HQ_{oral}

$$HQ_{oral} = \frac{LADD_{oral-water}}{RfD_{oral}} \quad (17)$$

吸入地下水污染物的危害商數 HQ_{inh} 的計算類似方程式(17)。

所以考慮飲用與吸入地下水污染物的非致癌風險以危害指數 HI 表示為



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

$$HI = HQ_{oral-water} + HQ_{inh} \quad (18)$$

同理，總危害指數是以簡單的個別污染物的危害指數的累加計算如下式：

$$HI_T = \sum_{i=1}^M HI_i \quad (19)$$

此處 HI_T 為全部污染物的總風險； HI_i 為第 i 個污染物的危害指數； M 為污染物總數目。

HI_T 大於 1 時表示會對人體健康產生危害，小於 1 時預期不會對健康造成傷害。



二、研究方法與過程

● 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

工作項目	年月	112/ 12	113/ 1	113/ 2	113/ 3	113/ 4	113/ 5	113/ 6	113/ 7	113/ 8	113/ 9	113/ 10	113/ 11	備註
場址空間資訊分析資料庫與地理視覺化模組														
MNA 評估模組														
							※							
健康風險評估模組														
建立應用案例														
軟體使用者測試														
撰寫使用者手冊														
撰寫期末報告														
												※		
投稿國際期刊論文														
工作進度估計百分比 (累 積 數)		10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %	
預定查核點	期中	完成場址空間資訊分析資料庫與地理視覺化模組												
	成果	完成軟體開發 完成應用案例 完成軟體使用者測試 完成使用者手冊 完成期末報告 撰寫 SCI 期刊論文												

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。

4、以 12 個月作規劃，其中期中報告書初稿提送要件需達計畫執行進度 50%以上，成果報告書初稿需於計畫結束前 1.5 個月提送。



三、結果與討論

本研究利用 C# 程式語言混合編譯開發全新的圖形使用者介面軟體 **MUS_t 2**，此軟體整合 Liao et al. (2021) 與研究團隊過去所發展的 FORTRAN 解析解計算程式，過去本團隊所開發的初版 **MUS_t** 具備圖形使用者介面的參數與情境輸入，可方便使用者選擇和設定參數/情境，同時利用視覺化工具函數庫 (Visualization ToolKit, VTK) 產生互動式情境畫面，方便使用者視覺化了解所想要模擬的情境。初版的 **MUS_t** 在模擬結果視覺化展示部份，可即時產生 5 個含氯污染物在監測井位置上濃度隨時間變化的曲線、固定時間下沿著不同方向的一維空間濃度剖面或是沿著特定深度的二維污染團移棲，也具有即時展示二維污染團遷移的動畫功能，增強模擬結果的可視化效果與使用者體驗。初版 **MUS_t** 雖然已具有功能強大的使用者介面，但是其存在使用者須自行在軟體外部產生模擬所需的相關參數的限制，因此在實務應用上有其不便利性。

為改進相關缺點，在 **MUS_t 2** 進行現地應用功能的增強，改進實務應用的友善性與便利性，因此 **MUS_t 2** 除保留初版 **MUS_t** 的基本功能外，另外也新增現地應用模組。**MUS_t 2** 的進入頁面設計包含兩個選項：「**基礎模組 (Basic mode)**」與「**場址模組 (Site mode)**」(如圖 8 所示)。頁面左邊選項為「**基礎模組**」的入口點擊處，「**基礎模組**」適合教學展示、自我學習、實驗室管柱示蹤劑試驗或使用者有污染物傳輸相關資料。頁面右邊為現地模式，頁面右邊則適合執行現地相關工作設計與後續的評估使用。在「**基礎模組**」部分除保留原有的功能，同時進行過去使用者回饋意見的修正與改善，修正包括使用者彈性定義相關參數的單位，以進一步改善軟體使用的友善度。在「**場址模組**」的設計主要是以便利友善污染場址管理為核心價值，由於含氯溶劑地下水污染場址的管理可能是數十年，因此工作人員的異動在所難免，為使工作人員異動不影響污染場址管理，因此調查資料的保存就是一件非常重要的工作，另外場址的管理主要是基於場址概念模型 (site conceptual model, 簡稱 SCM)，SCM 描述污染物從污染來源經環境介質與曝露途徑到達受體的過程。SCM 應該包括地質、水文與化學三個組成，地質主要是要能概念化描述地下流體流動的物理架構(區分含水層與阻水層)，也就是建立水文地質概念模型。水文主要是描述在此物理架構的流體遷移，因此重點是地下水在含水層的流動方向與流速大小。化學則描述伴隨地下水流的化學污染物遷移與其與地層間礦物可能產生化學、物理與生物等交互作用。

圖 9 說明 **MUS_t2** 的場址模組完整流程，依步驟選擇「**場址模組**」後，頁面的左邊呈現相關選項(如圖 10 所示)，首先可選擇「**Site**」載入場址相關資訊，場



三、結果與討論

址相關資訊包括可載入場址邊界的.shp 檔案(如圖 11)。經載入邊界的.shp 檔案後，圖 12 主要是呈現在頁面右邊的邊界的地理視覺化展示(如圖 12 中的藍色線條)。使用者也可以載入監測井相關地理空間位置資料如圖 13，經載入監測井相關地理空間位置資料後，頁面右邊會地理視覺化展示監測井位置。

載入場址的資訊後，使用者可以選擇頁面左邊的「**Geology**」載入地質相關資訊，載入相關檔案後頁面右邊會展示每一個岩心的材料特性，使用可自己選用顏色定義材質特性，圖 14 為岩心的三維地理視覺化展示。

接著使用者可選擇左邊的「**Hydrology**」，載入地下水水位相關資訊(如圖 15 所示)。圖 16 則是監測井的地下水水位的地理視覺化展示，其中不同顏色代表不同的地下水水位高度。藉由監測井地下水水位資訊可進行空間內插產生等水位線(contour)，圖 17 顯示當使用者點選「**Generate flow field**」可以呈現等水位線，同時也可以利用等水位線的垂直方向，產生地下水流向，展示場址的地下水流場。為方便使用者輸入模式所需的地下水平均流速，圖 18 則是當使用者選擇「**Generate flow field**」時可以計算的平均地下水流速。

圖 19 則是使用者選擇左邊的「**Chemistry**」可以載入監測井地下水污染物濃度監測資料，同時頁面右邊可以展示地下水污染物濃度的地理視覺化。圖 20 則是使用者選擇左邊的「**Site conceptual model integration**」，並點選頁面上方的「**Domain**」選項可以設定模擬維度跟範圍。圖 21 在頁面上方的「**Source**」選項中「**Source history**」表示污染源的濃度隨時間的變化，此初可以考慮污染源濃度為「**Constant**」、「**Exponential decay**」與「**Build manually**」三種選項設定污染源濃度隨時間變化，同時右邊的圖會顯示對應的污染源濃度隨時間的變化(橫坐標維時間，縱座標為污染源濃度)。選擇「**Constant**」意味污染源濃度為常數不隨時間改變，**BIOCHLOR** 軟體就是考慮污染源濃度為常數不隨時間改變，「**Exponential decay**」則是污染源濃度隨著時間指數遞減，**REMChlor** 軟體一個特例就是污染源濃度隨著時間指數遞減(，**REMChlor** 的 $\Gamma=1$)，選擇「**Build manually**」則是當使用者取得污染熱區濃度隨時間的變化資料，可自行設定濃度隨時間的變化。

圖 22 則是提供使用者設定模擬的區域與相關水文地質與延散參數，選擇「**Transport**」可設定模擬相關資訊，在「**Hydrogeology**」可以依序輸入水力傳導係數「**Hydraulic conductivity**」、水力梯度「**Hydraulic gradient**」與有效孔隙率「**Effective porosity**」。選擇延散「**Dispersion**」則可以設定縱向延散係數「**Longitudinal dispersion**」與側向延散係數「**Transverse dispersion**」。圖 23 則



是使用者可以選擇「**Reaction**」設定每一個污染物的降解常數「**Decay reaction**」、前後代污染物的質量轉換常數「**Yield coefficient**」與個別污染物的遲滯因子「**Retardation factor**」。

如果使用者計算健康風險評估，須給定暴露參數與毒性因子，圖 24 選擇「**Exposure**」可設定暴露參數「**Exposure parameter**」與不同污染物的毒性資料「**Toxicological data**」進行健康風險評估參數設定。

MUST 2 的「**場址模組**」提供模擬結果輸出的多種選擇，圖 25 中在頁面左邊的「**Output**」可設定模擬結果的輸出，在「**Options**」可以選擇不同的輸出方式，當選擇「**Breakthrough curves at observation points**」意味固定觀測位置污染物濃度隨時間的變化(即所謂的穿透曲線)，下方的「**Settings**」可設定模擬的時間範圍，右邊的上方選項停留在「**Concentration**」則會視覺化展示模擬結果輸出。圖 26 則是點選右上方「**Show data value**」提供模擬結果數值輸出。圖 27 則是在右上方移動至「**Risk**」可以顯示風險視覺化的計算結果。

除了固定點的穿透曲線外，圖 28 則是選擇「**Concentration profile along x direction**」會展示污染物濃度隨距離的變化。圖 29 在右上方選擇「**Risk**」可以顯示風險視覺化的計算結果。

為了讓模擬結果更便利地下水污染場址的管理，將模擬結果與地圖套疊展示高濃度區域的地理空間分布是非常重要的，圖 30 選擇「**Concentration contour on map**」可將模擬結果套疊地圖進行地理視覺畫展示。



三、結果與討論

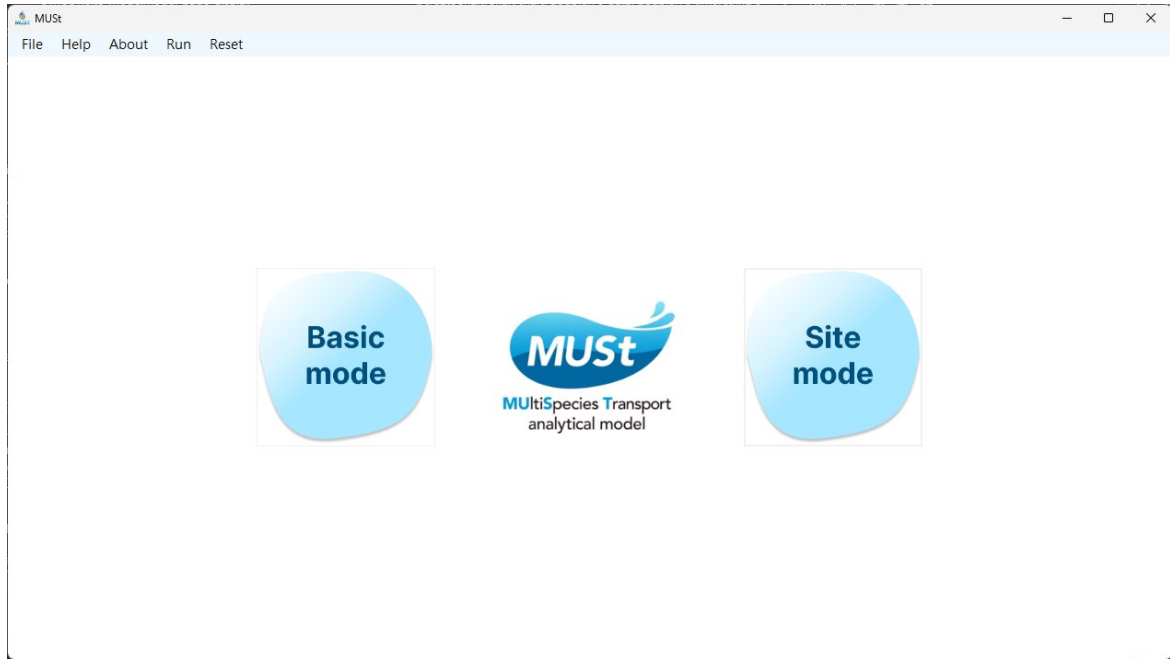


圖 8 MUST2 的進入頁面設計，此處包含兩個選項：「基礎模式」與「現地模式」。

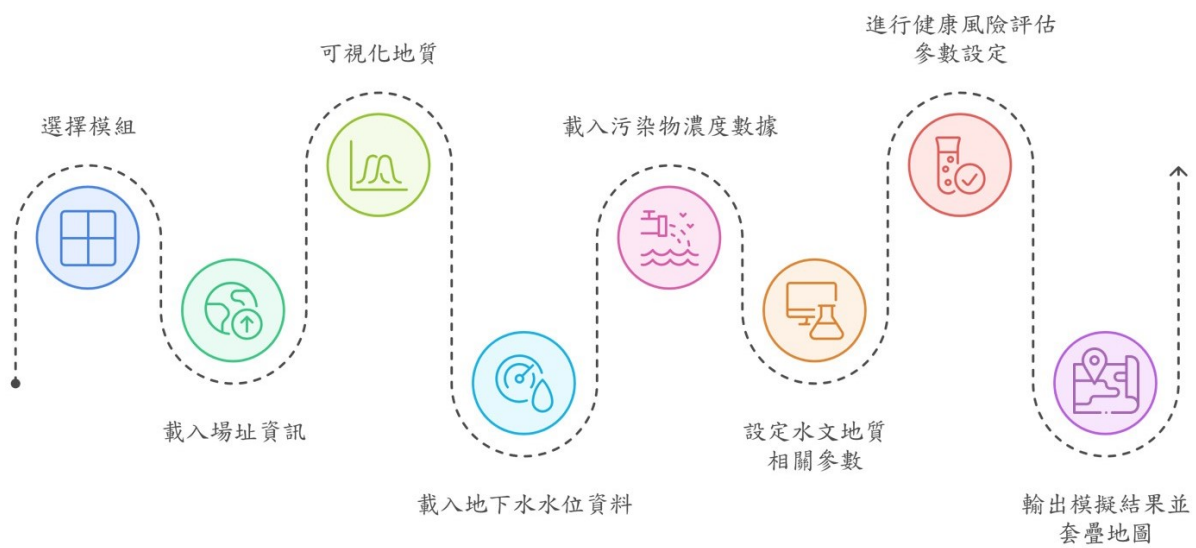


圖 9 MUST2 場址模組流程圖。



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

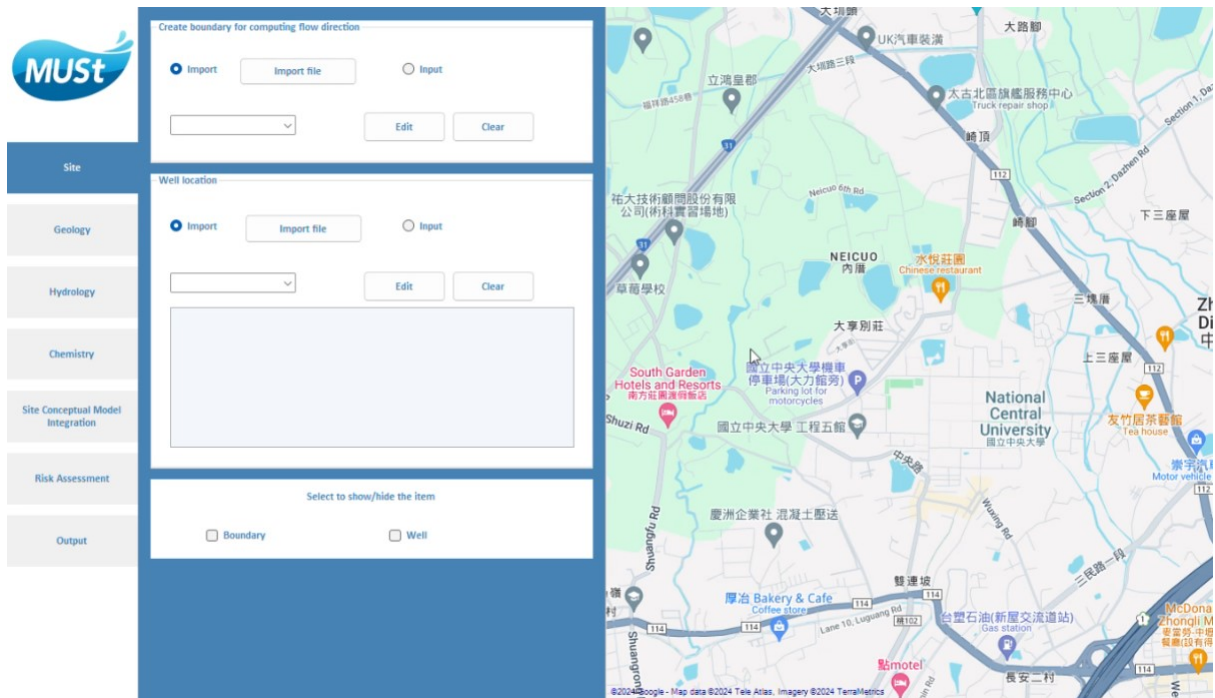


圖 10 進入現地模式後頁面左邊的相關選項，首先可選擇「site」載入場址相關資訊。

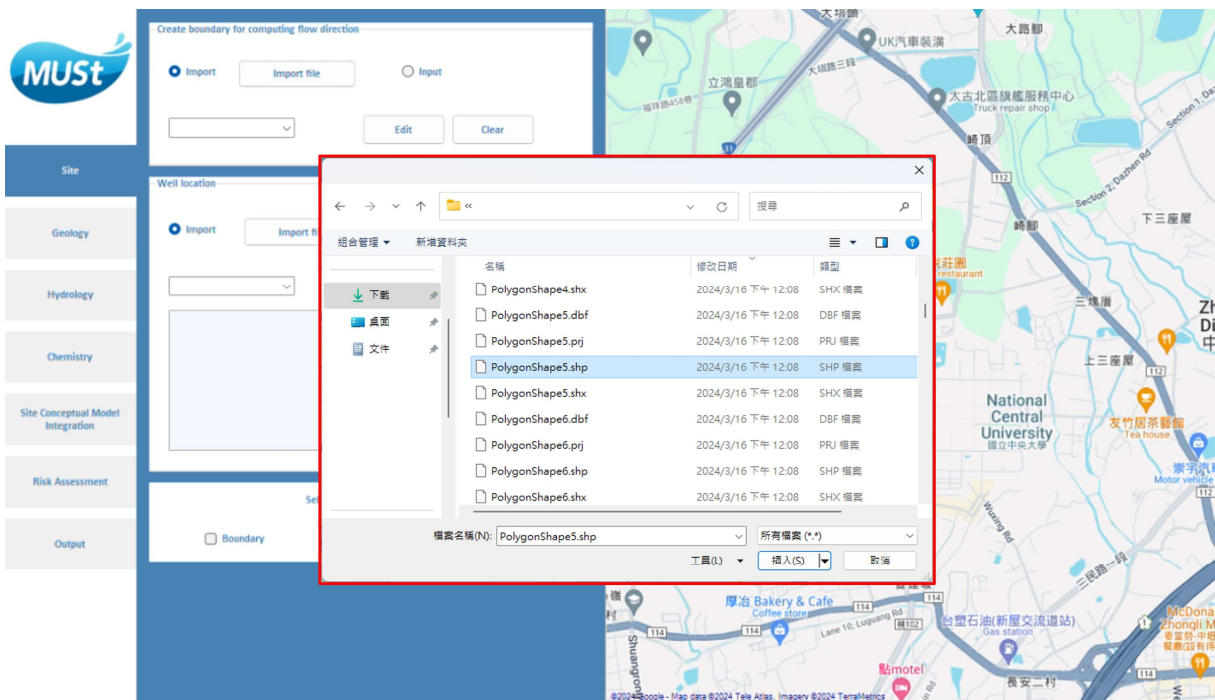


圖 11 由資料匣載入.shp 檔案。



三、結果與討論

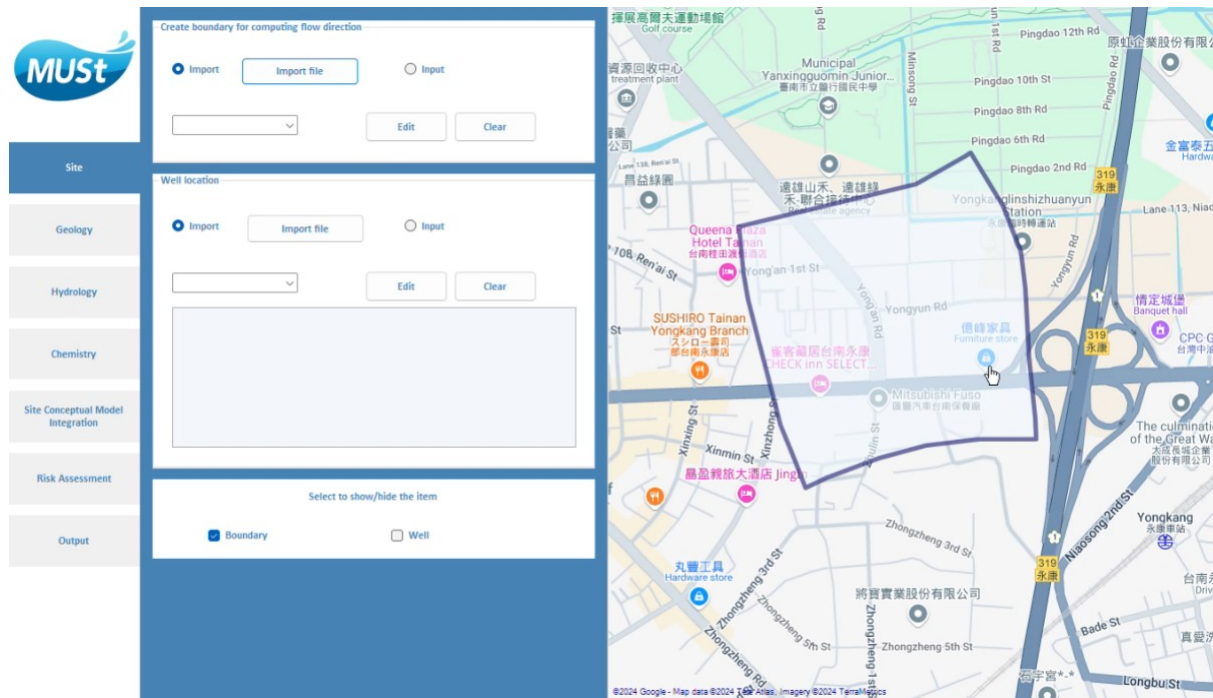


圖 12 載入邊界的.shp 檔案，在頁面右邊展示邊界的地理視覺如藍線。

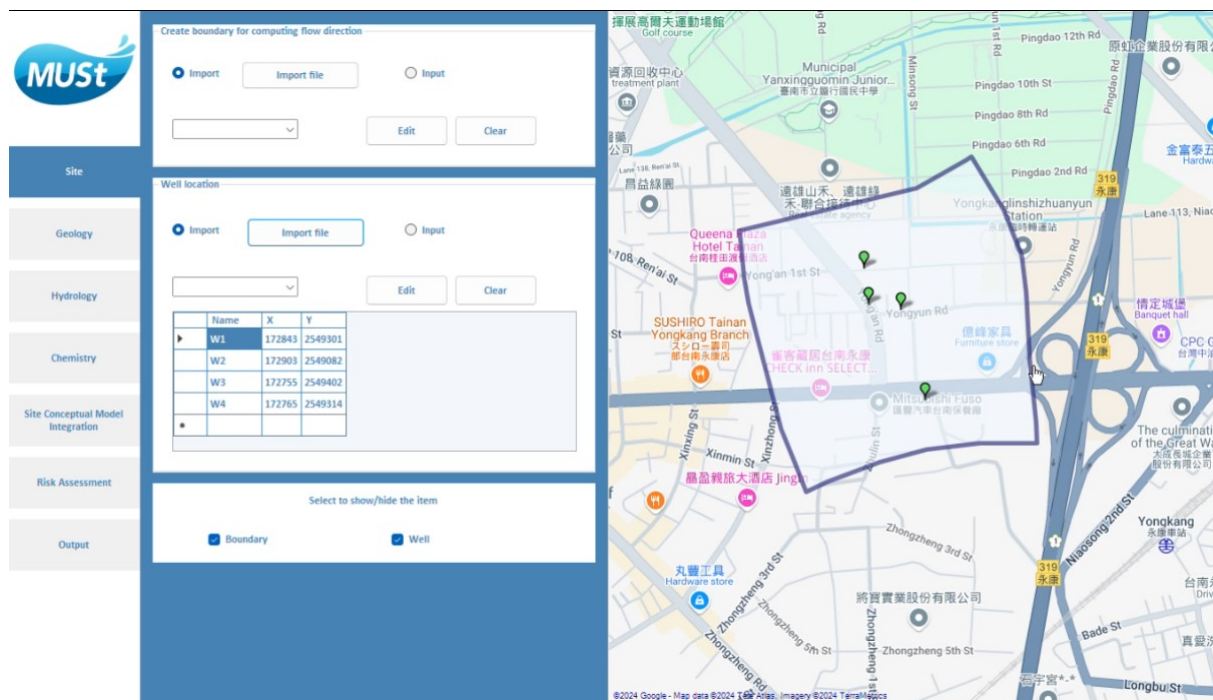


圖 13 載入監測井地理空間相關資料，右邊也會進行監測井位置的地理視覺化展示。



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

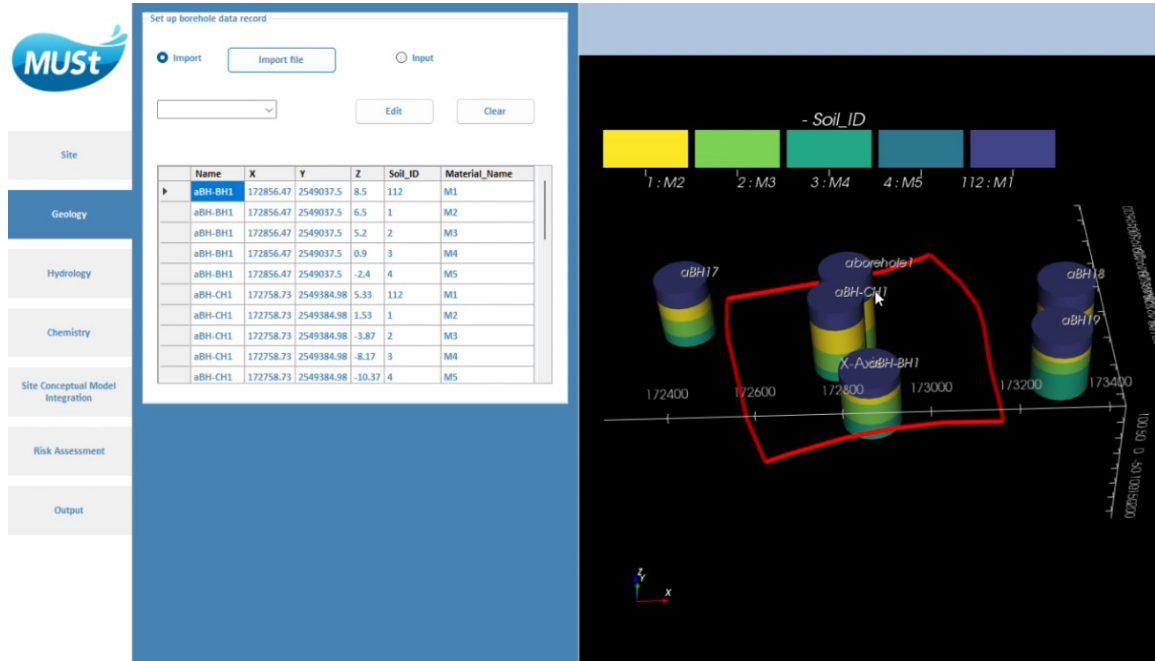


圖 14 岩心三維地理視覺化展示。

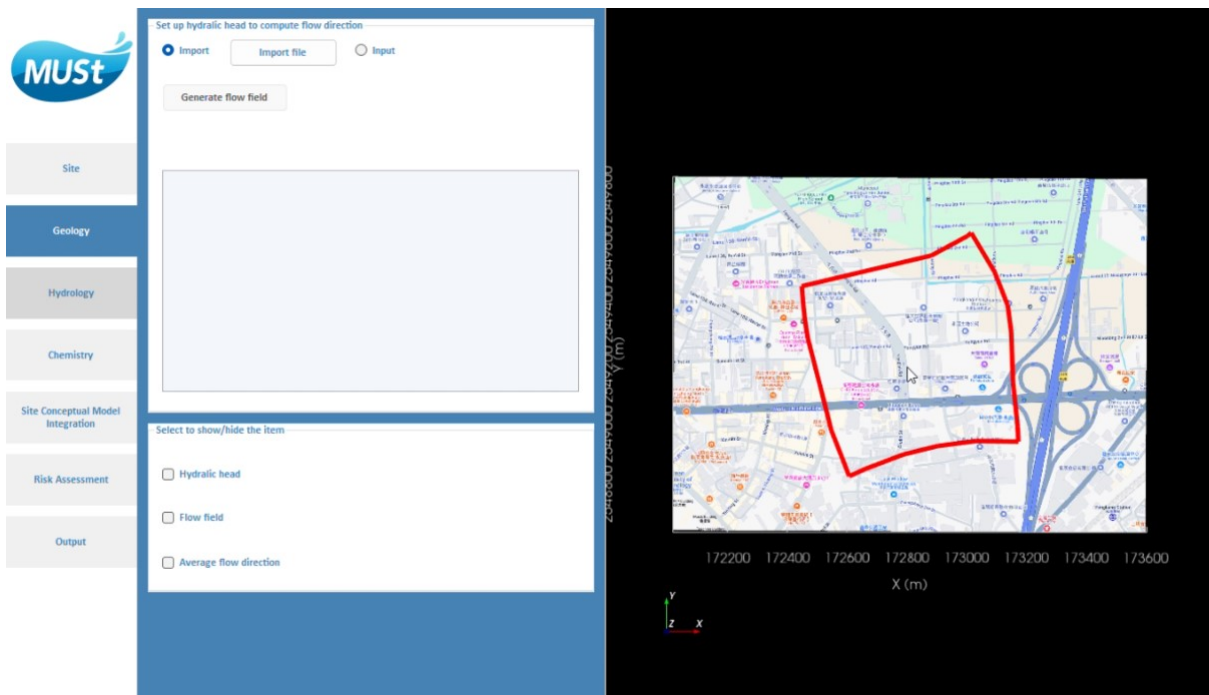


圖 15 使用者可選擇左邊的「Hydrology」，載入地下水水位相關資訊。



三、結果與討論

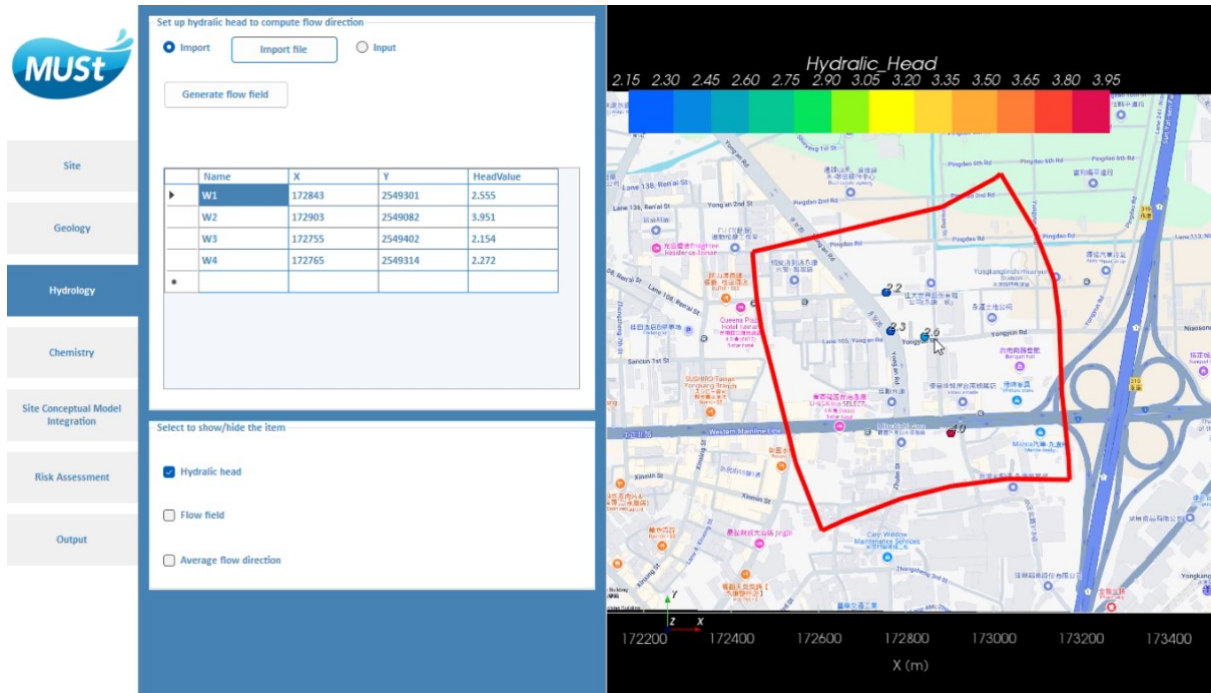


圖 16 監測井的地下水水位的地理視覺化展示，其中不同顏色代表不同的地下水水位高度。

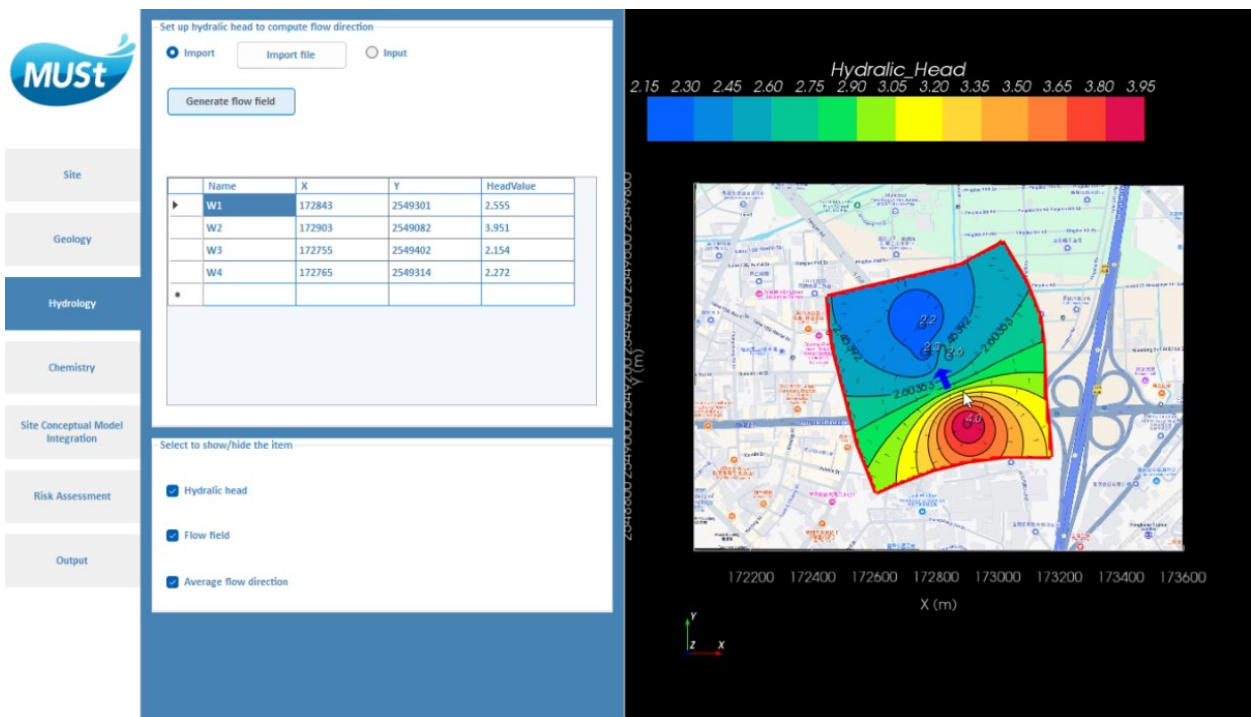


圖 17 點選「Generate flow field」可以呈現等水位線，同時也可以產生地下水流向，展示場址的地下水流場。



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

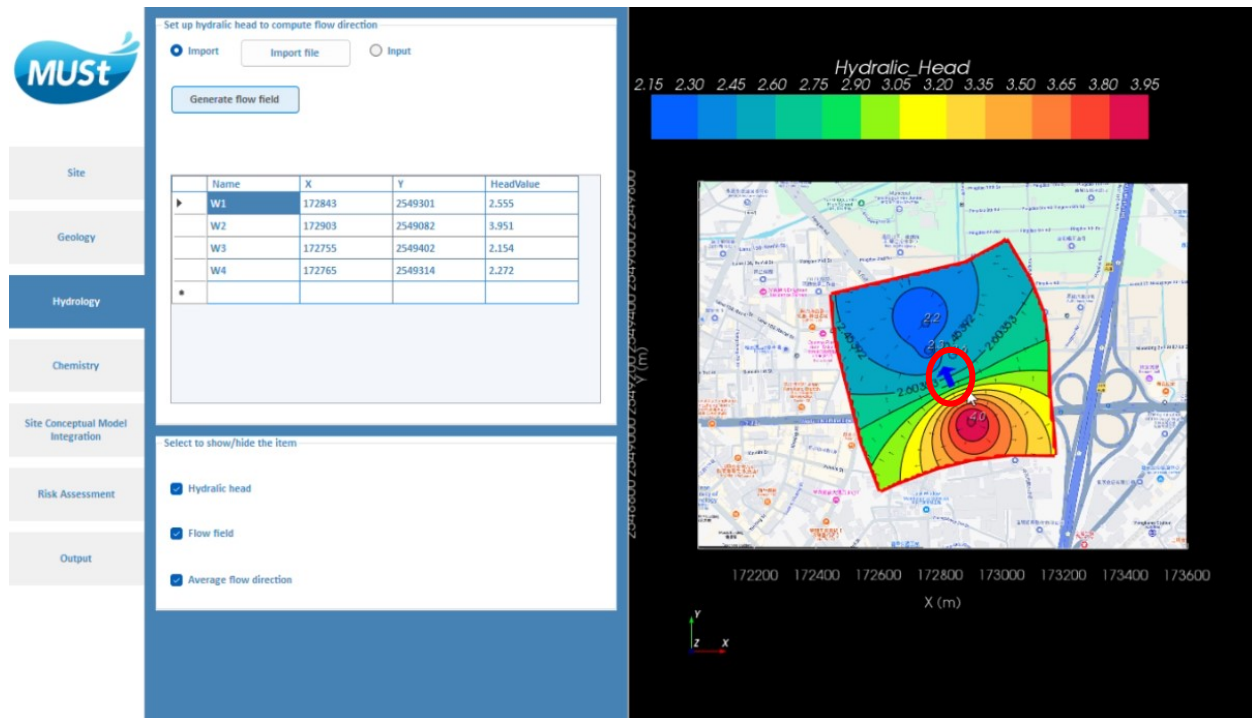


圖 18 同時也可以計算平均地下水流速。

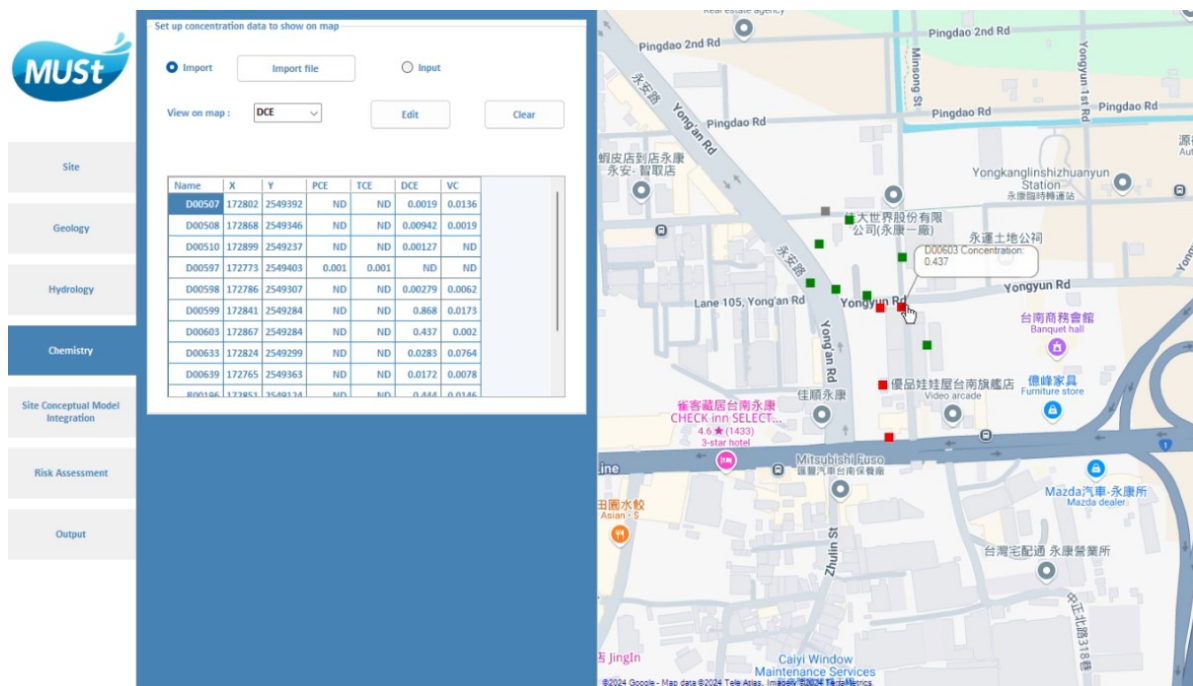


圖 19 選擇左邊的「Chemistry」可以在入監測井濃度資料，同時頁面右邊可以展示濃度的地理視覺化。



三、結果與討論

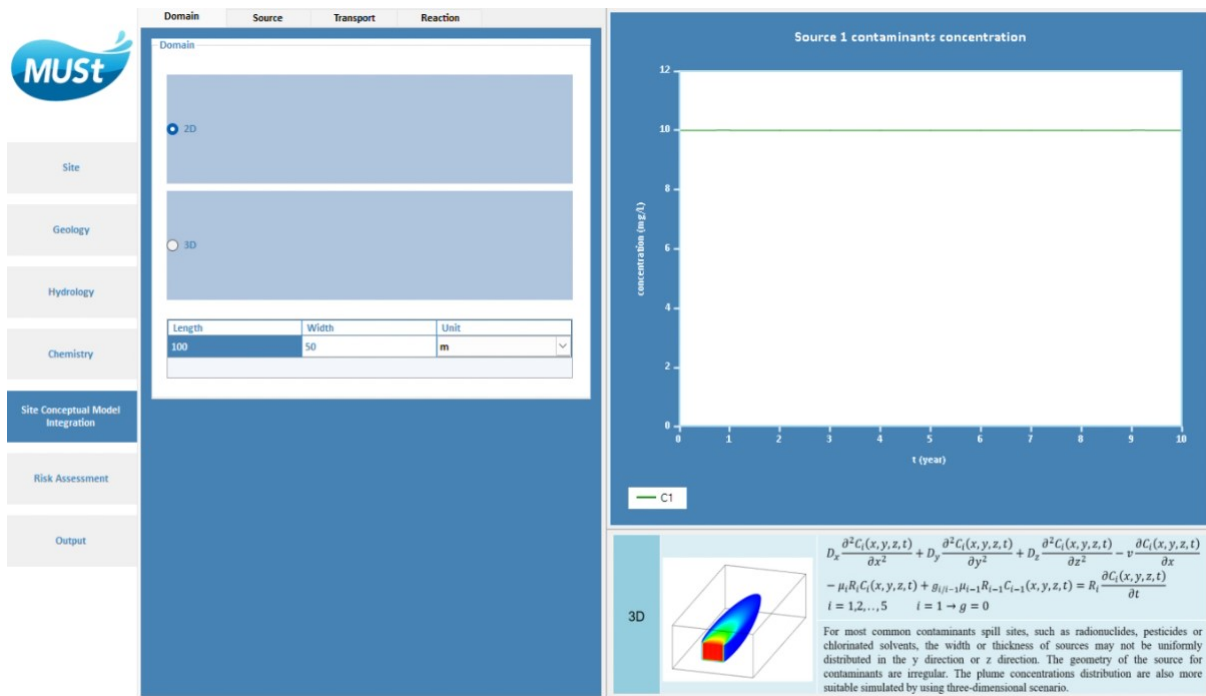


圖 20 選擇左邊的「Site conceptual model integration」，並點選頁面上方的「Domain」選項可以設定模擬的維度與範圍。

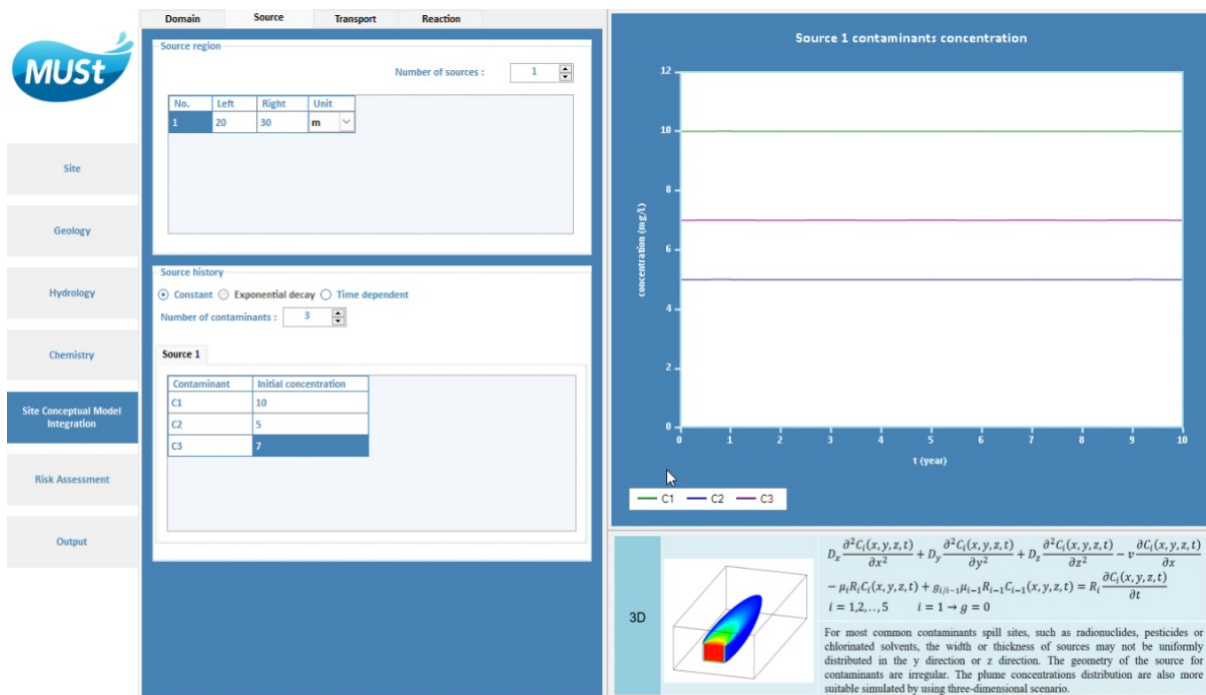


圖 21 在「Source history」提供「Constant」、「Exponential」與「Build manually」三種選項設定污染源濃度隨時間變化。同時右邊會顯示對應的污染源濃度隨時間的變化。



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

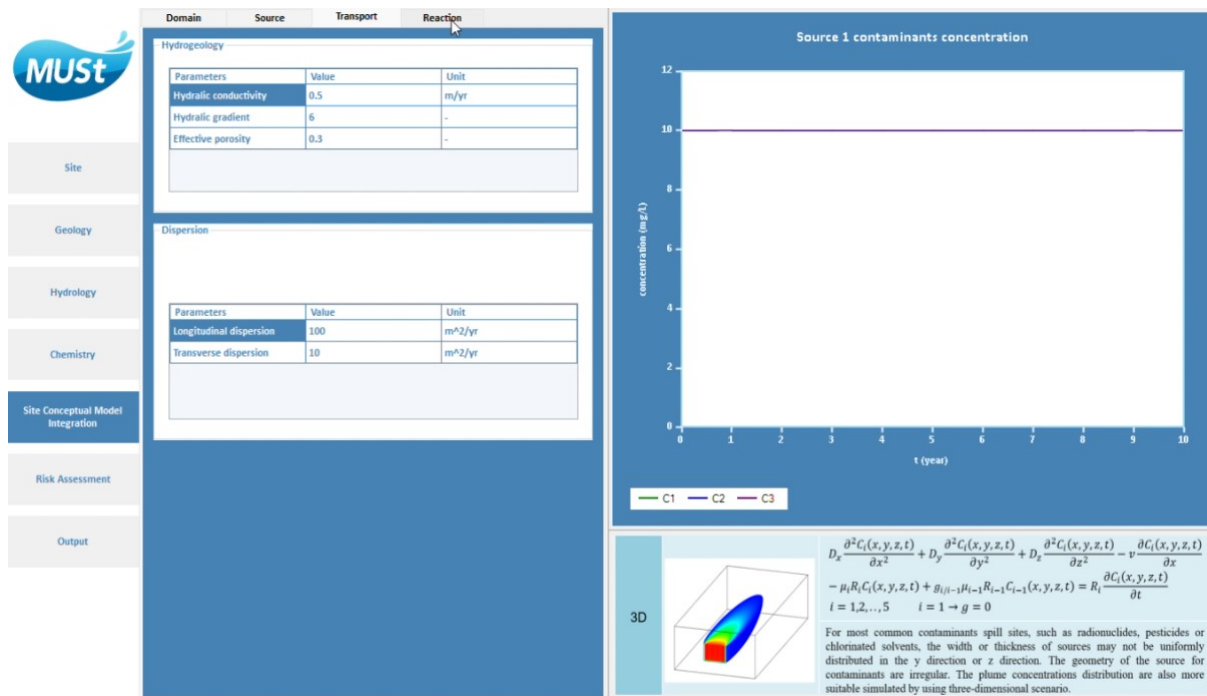


圖 22 選擇「Transport」可設定模擬相關資訊，選擇「Hydrogeology」可以依序輸入水力傳導係數「Hydraulic conductivity」、水力梯度「Hydraulic gradient」與有效孔隙率「Effective porosity」。選擇延散「Dispersion」可以設定縱向延散係數「Longitudinal dispersion」與側向延散係數「Transverse dispersion」。

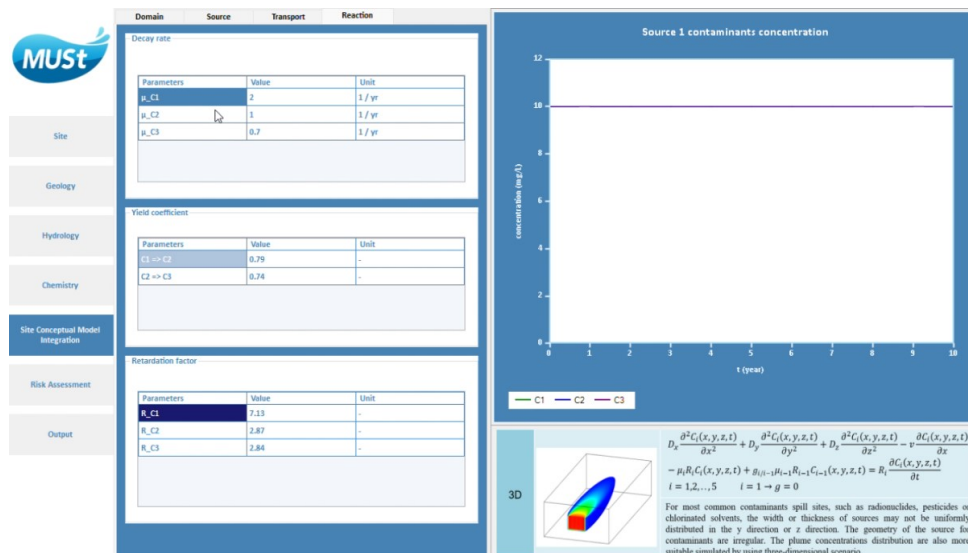


圖 23 選擇「Reaction」可以設定每一個污染物的降解常數「Decay reaction」、前後代污染物的質量轉換常數「Yield coefficient」與個別污染物的遲滯因子「Retardation factor」。



三、結果與討論

Include risk assessment

Exposure parameters

Parameters	Value	Unit
Ingestion Rate (IR)	2	L/day
Exposure Frequency (EF)	350	day/yr
Exposure Duration (ED)	30	yr
Body Weight (BW)	70	kg
Averaging Time (AT)	25550	day

Toxicological data

Cancer slope factor

Parameters	Value	Unit
CSF_C1	0.003	1/mg/kg-day
CSF_C2	0.003	1/mg/kg-day
CSF_C3	0.003	1/mg/kg-day

Reference dose

Parameters	Value	Unit
RfD_C1	0.001	mg/kg-day
RfD_C2	0.001	mg/kg-day
RfD_C3	0.001	mg/kg-day

圖 24 選擇「Risk Assessment」可設定暴露參數「exposure parameter」與不同污染物的毒性資料「Toxicological data」進行健康風險評估參數設定。

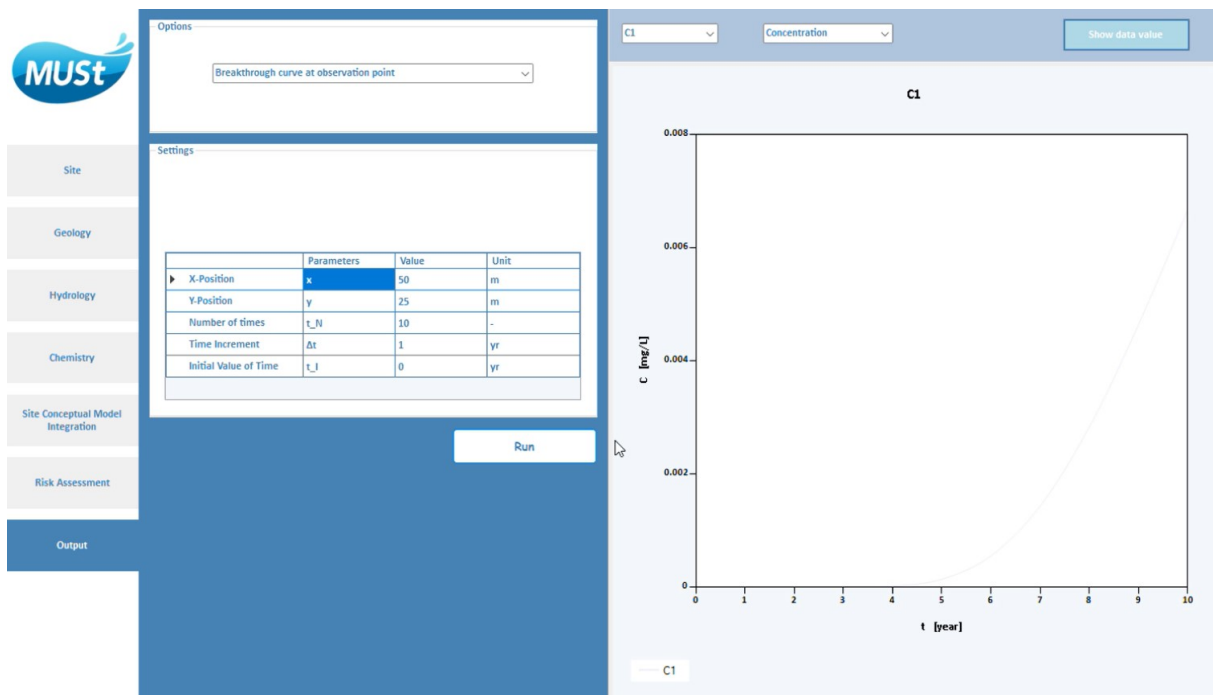


圖 25 在頁面左邊的「Output」可設定模擬結果的輸出，在「Options」可以選擇不同的輸出方式，下方的「Settings」可設定模擬的範圍，右邊的上方選項停留在「Concentration」會視覺化展示模擬結果輸出。



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

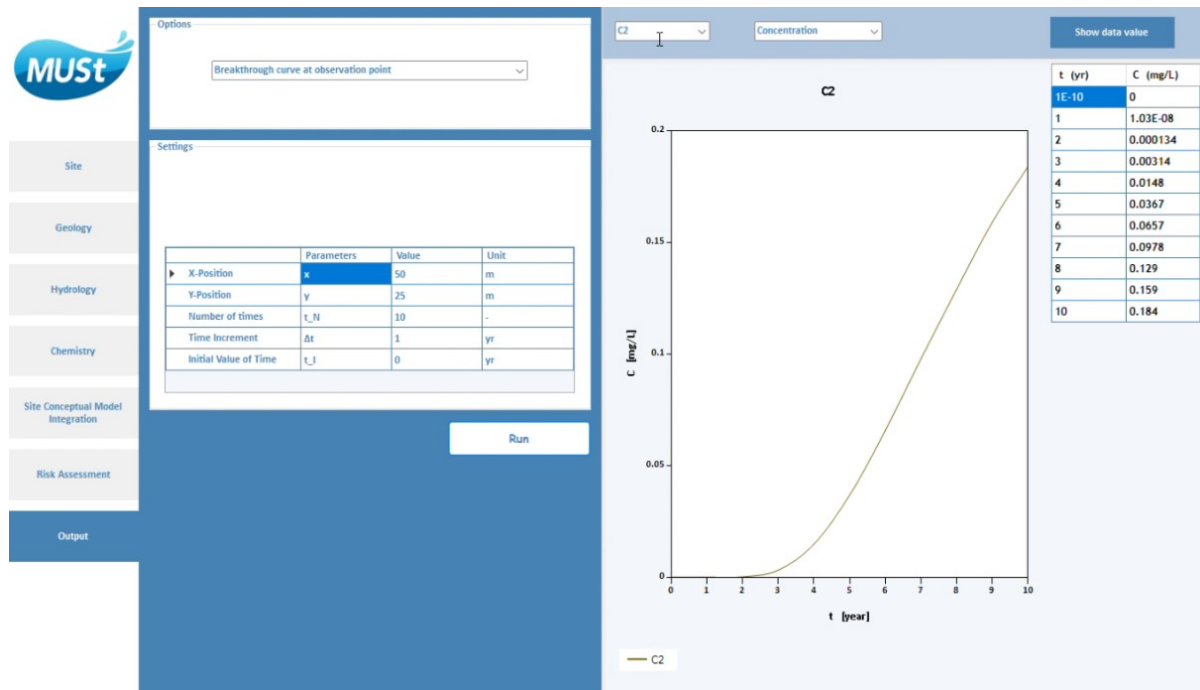


圖 26 在右上方選擇「Data value」可以顯示模擬結果數值輸出。

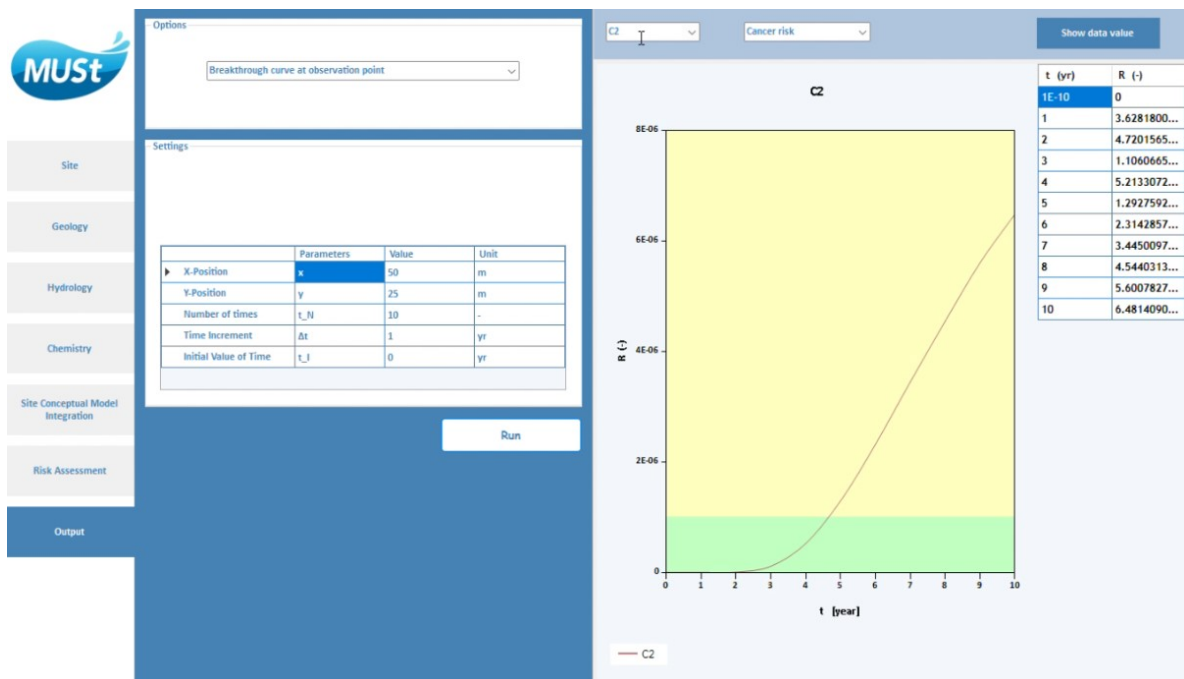


圖 27 在右上方選擇「Risk」可以顯示風險視覺化的計算結果。



三、結果與討論

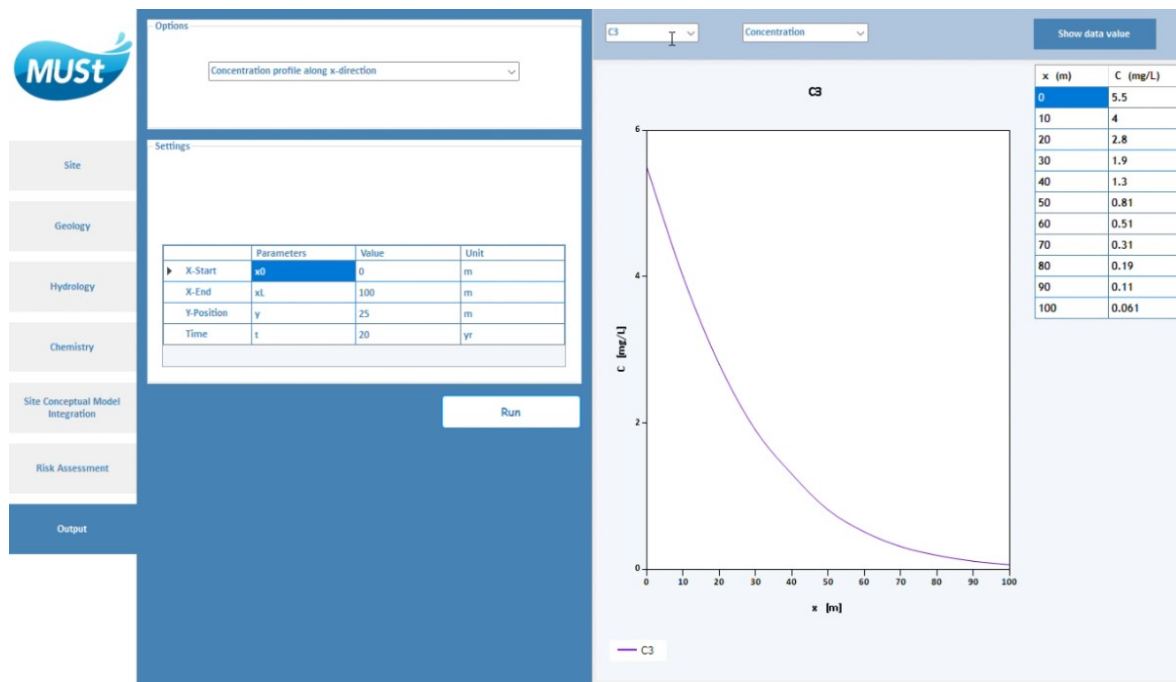


圖 28 選擇「Concentration profile along x direction」會展示濃度隨距離的變化。

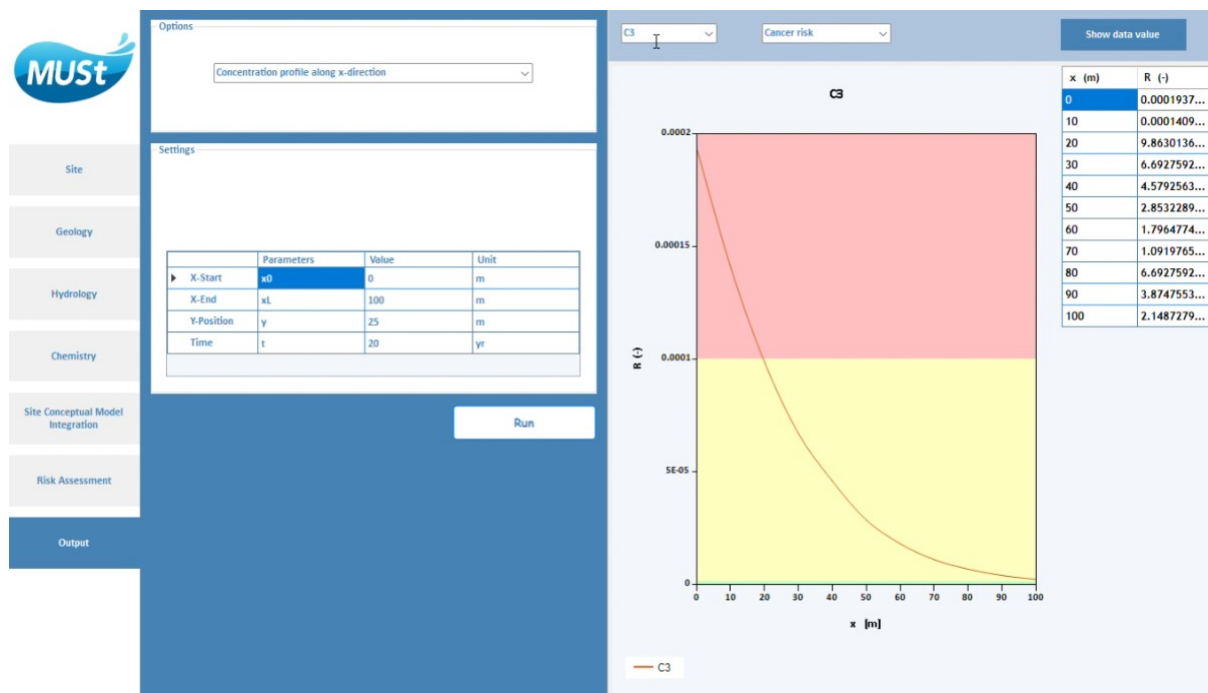


圖 29 在右上方選擇「Risk」可以顯示風險視覺化的計算結果。



地下水含氯溶劑污染場址監測式自然衰減與健康風險整合評估軟體開發

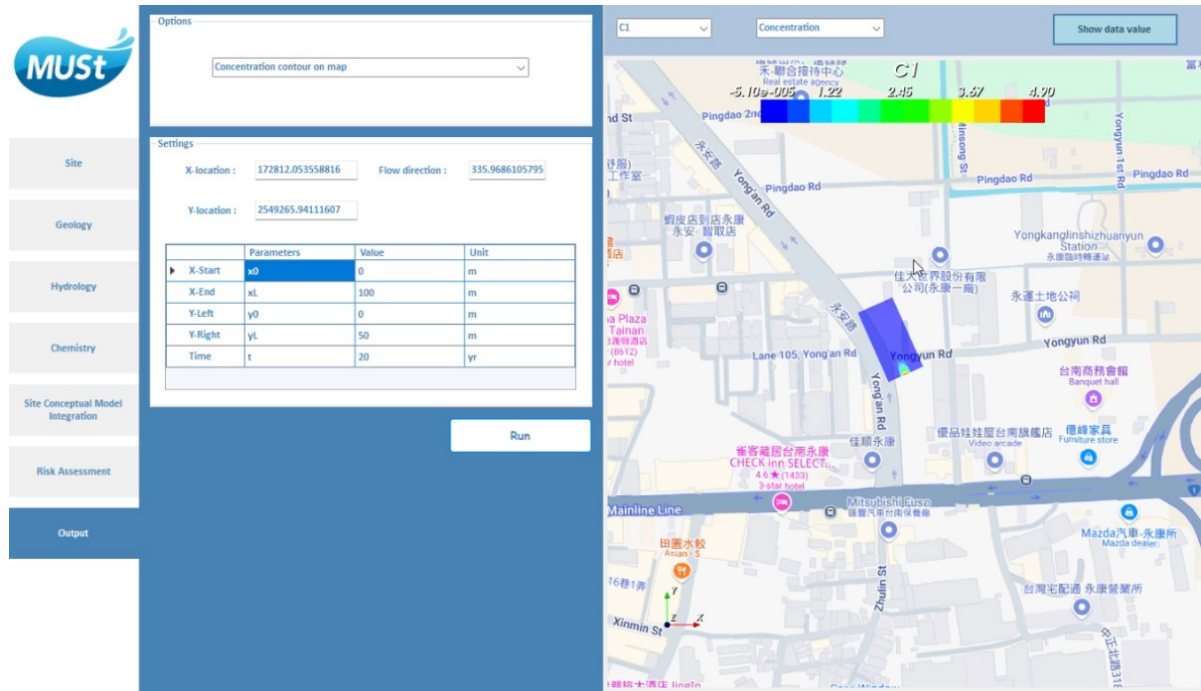


圖 30 選擇「Concentration contour on map」可將模擬結果套疊地圖進行地理視覺畫展示。



四、結論與建議

本計畫發展監測式自然衰減與健康風險評估軟體，為便利模擬軟體的實務應用，特別在過去的 MUST 軟體的「基礎模組」下，新增「場址模組」，新增模組包括(1)發展 MNA 所需的地質、水文與化學資訊的場址空間資訊資料庫與地理視覺化模組，工程師可直接在此模組進行地質、水文與化學圖資的整合，可以節省人力資源時間，進而方便管理決策制定；(2)三維含氯污染物與降解產物共存的污染傳輸解析解模式作為核心的圖形使用者介面 MNA 評估模組，主要是讓使用者直接在場址的地圖系統上執行模擬的相關工作便利工程在場址管理工作的便利性，與節省人力資源；(3)結合三維含氯污染物與降解產物共存的傳輸解析解模式，作為健康風險評估暴露量計算基礎，開發含氯溶劑地下水污染健康風險評估計算模組，讓風險評估的結果地理視覺化，便利的含氯溶劑地下水污染健康風險評估、風險溝通與風險管理。總而言之，這是非常便利地下水污染場址 GIS 智慧的管理工具。

本計畫完成所需相關頁面的設計，完成個別功能的程式碼的撰寫與軟體開發，完成開發的軟體將邀請瑞昶科技股份有限公司進行相關軟體測試，並根據其使用的意見回饋進行修正與改善。

模擬的信賴度取決於模擬結果能與場址現地觀測的地下水水位與監測的污染物濃度，由於污染場址的地下水水位與污染物濃度容易有季節性變化，因此需藉由較高頻率的現地觀測的地下水水位與較多次的地下水水質採樣與分析去掌握地下水水位與污染物濃度的季節性變化，如此模擬結果能與更多的季節性變化的資料比較，以呈現模擬結果的信賴度。因此團隊建議後續希望爭取模場計畫的支持，希望在足夠的經費下團隊親自規劃具有品質的較高頻率的地下水水位觀測與污染物濃度間去確實掌握地下水水位與污染物濃度的季節性變化。整體目標希望從現地的調查到模式的應用建立系統性含氯溶劑地下水污染場址的地下水流場與污染物遷移調查、評估與模擬(包含已現地資料校正)以及健康風險評估的標準流程，提供具有科學佐證的污染物遷移模擬與健康風險評估，相關污染物遷移模擬與健康風險評估的成果可以提供作為預測地下水污染的未來趨勢、評估監測式自然衰減有效性等行政管制策略參考基礎或作為公正信任的社會溝通。

另外國內土壤地下水污染場址中亦有許多適於推展 MNA 及健康風險評估、風險控管等工法，建議主管機關可考慮積極推展本研究整合評估軟體在國內場址之應用。



五、參考文獻

- Aziz, CE, Newell CJ, Gonzales, JR, Hass P, Clement TP, Sun Y, 2000. BIOCHLOR-Natural Attenuation Decision Support System v1.0, User's Manual, US EPA Report, EPA 600/R-00/008
- Chen JS, Lai KH, Liu CW., Ni CF. 2012. A novel method for analytically solving multi-species advective-dispersive transport equations sequentially coupled with first-order decay reactions. *Journal of Hydrology*, 420–421(14), 191-204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.001>
- Chen JS, Liu CW, Liang CP, Lai KH. 2012. Generalized analytical solutions to sequentially coupled multi-species advective-dispersive transport equations in a finite domain subject to an arbitrary time-dependent source boundary condition. *Journal of Hydrology*, 456–457(16), 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.017>
- Chen JS, Liang CP, Liu CW, Li LY. 2016. An analytical model for simulating two-dimensional multispecies plume migration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 733-753. <https://doi.org/10.5194/hess-20-733-2016>
- Chen JS, Ho YC, Liang CP, Wang SW, Liu CW. 2019. Semi-analytical model for coupled multispecies advective-dispersive transport subject to rate-limited sorption. *Journal of Hydrology*, 579, 124794. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124164>
- Chen JS, Liang CP, Chang CH, Wan MH. 2019. Simulating three-dimensional plume migration of a radionuclide decay chain through groundwater. *Energies*, 12, 3740. <https://doi.org/10.3390/en12193740>
- Chen JS, Jiang SY, Suk H, Liang CP, Liu CW. 2023, Analytical multispecies chemical mixture transport model comprising degradable byproducts subject to scale-dependent dispersion, *Hydrogeology Journal*, 31(2), 453-464. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02572-8>
- Falta RW, Stacy MB, Ahsanuzzaman WM, Earle RC, 2007. Remediation Evaluation Model for Chlorinated Solvents (REMChlor), EPA/600/C-08/001



五、參考文獻

- Liao ZY, Suk H, Liu CW, Liang CP, Chen JS. 2021. Exact analytical solutions with great computational efficiency to three-dimensional multispecies advection-dispersion equations coupled with a sequential first-order degradation reaction network. *Advances in Water Resource*, 155, 104018. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104018>
- Liao ZY, Suk H, Chang CH, Liang CP, Liu CW, Chen JS*. 2022, General analytical solutions of multispecies advective-dispersive solute transport equations coupled with a complex reaction network, *Journal of Hydrology*, 128633. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128633>
- McGuire TM, Newell CJ, Looney BB, Vangelas KM, Sink CH, 2004. Historical analysis of monitored natural attenuation: a survey of 191 chlorinated solvent site and 45 solvent plumes. *Remediation Journal*, 15, 99–112. <https://doi.org/10.1002/rem.20036>
- Nguyen TU, Ho YC, Suk H, Liang CP, Liao ZY, Chen JS, 2024, Semi-analytical models for two-dimensional multispecies transport of sequentially degradation products influenced by rate-limited sorption subject to arbitrary time-dependent inlet boundary condition, *Advance in Water Resources*, Available online 28 December 2023, 104612. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2023.104612>
- Suk, H, Zheng KW, Liao ZY, Liang CP, Wang SW, Chen JS, 2022, A new analytical model for transport of multiple contaminants considering remediation of both NAPL source and downgradient contaminant plume in groundwater, *Advances in Water Resources*, 167, 104290. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104290>