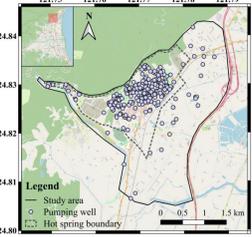


摘要

近年來, 休閒活動在大眾生活中佔據越來越重要的地位, 而溫泉區一直是人們冬季旅遊的熱門選擇之一。隨著永續觀念的興起, 觀光發展需要同時考慮溫泉的永續利用。本研究透過整合異質性地質模型和地下水流數值模式, 以評估礁溪溫泉適當的溫泉使用量。

本研究運用地下水模擬系統(Groundwater Modeling System, GMS)軟體, 以馬可夫鏈法(Markov chain)產製數十個實現場的沉積層異質性水文地質模型, 並將各個實現場與底部的均質性基盤整合為三維地質模型。因實務上無法針對每個地質模型進行數值模式率定, 因此本研究提出一套篩選流程, 選定一礁溪地區代表水文地質模型。隨後, 再將其轉換為MODFLOW地下水流數值模型, 並結合MT3DMS套件進行水-熱模擬, 以獲取地下水流程和溫度場的分布情況。最後通過模擬在不同抽水量下的水位及溫度場變化分布, 導入管理水位, 進一步評估合適的抽水量, 以提供未來溫泉資源規劃之參考。本研究建立之研究流程與架構, 可以作為不同地區水資源管理的依據, 實現對溫泉資源的永續發展目標。



研究方法

T-PROGS (Markov chain method)

$$t_{jk}(h) = Pr\{k \text{ occurs at } x+h | j \text{ occurs at } x\}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} r_{jj,z} & \dots & r_{jk,z} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{kj,z} & \dots & r_{kk,z} \end{bmatrix} \quad r_{jk,z} = \frac{\partial t_{jk}(0)}{\partial h_z}$$

t_{jk} : Transition probability
 R_z : Transition rate matrix in z direction

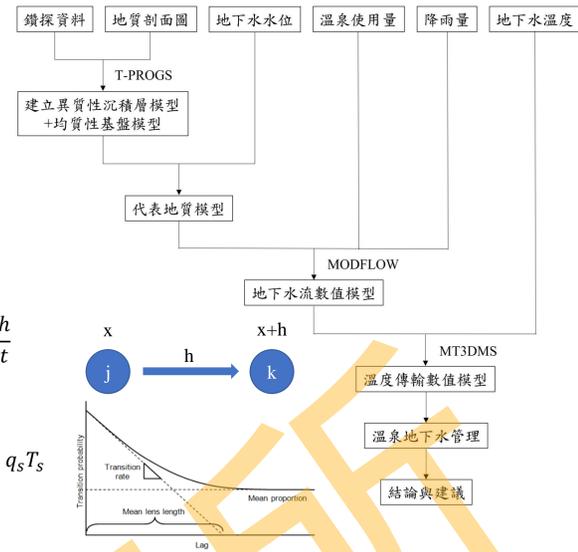
MODFLOW

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

MT3DMS

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d^T}{\theta} \right) \frac{\partial (\theta T)}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\theta \left(D_m^T + \alpha \frac{q}{\theta} \right) \nabla T \right] - \nabla \cdot (qT) + q_s T_s$$

K_d^T : Distribution coefficient for the temperature species [$L^3 M^{-1}$]
 D_m^T : Thermal diffusivity for the temperature species [$L^2 T^{-1}$]

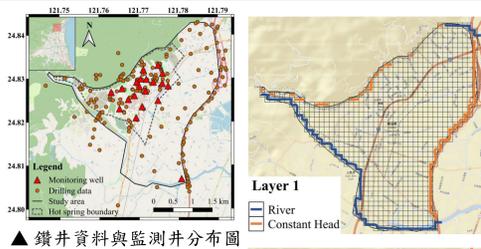


地質模型

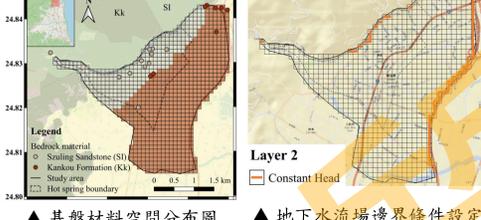
利用指標克利金法與半變異圖找到地質材料在東北-西南方向上有最大連續性。將結果輸入T-PROGS套件, 產製數十個實現場的異質場沉積層並與均質場基盤整合為三維地質模型, 利用本研究提出的篩選流程選定代表地質模型。當三維地質模型建置數達30個時, 整體的地下水位變異數及平均值趨於穩定。因此, 本研究針對此30個平均數值模型模擬的地下水位, 以決定係數(R-squared)最高及平均絕對誤差(Mean absolute error)最小的統計特性, 決定模型21為代表地質模型。

地質材料在N10°E、S80°E的連續性(m)及體積比例

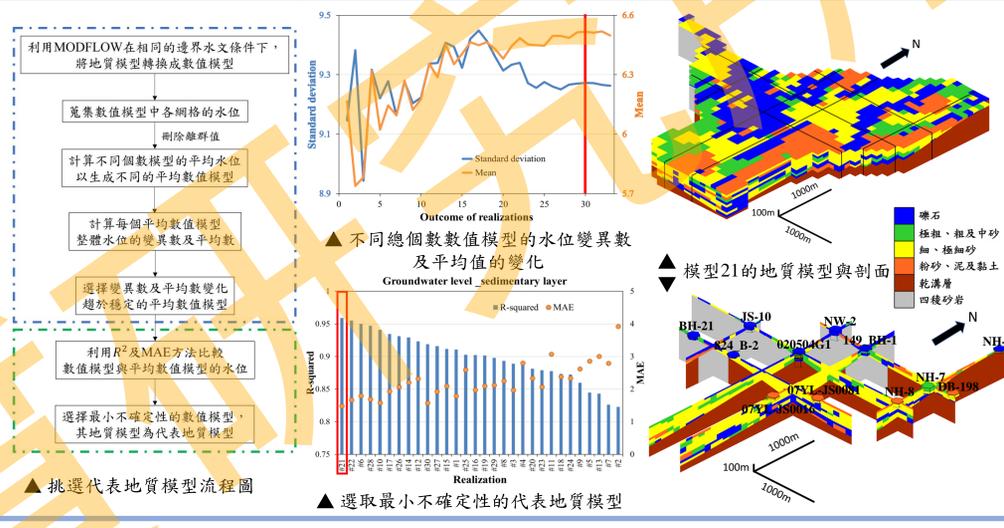
地質材料	連續性(m)	體積比例(%)	
礫石	500	200	25.8
極粗、粗及中砂	250	250	16.6
細、極細砂	601	412	45.6
粉砂、泥及黏土	320	250	12



鑽井資料與監測井分布圖



基盤材料空間分布圖



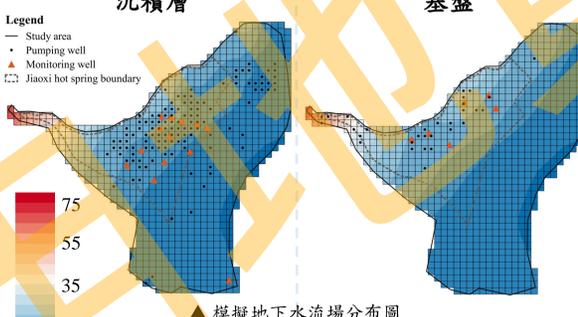
挑選代表地質模型流程圖

地下水流場、溫度場

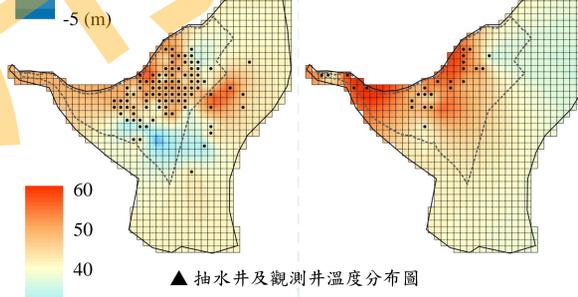
沉積層模擬水位與實際觀測水位的適合度達0.92, 表示此模型具一定的代表性。本研究將穩態地下水流場結合MT3DMS套件進行水-熱模擬, 並在基盤設置兩處熱源。結果顯示, 在溫泉區內模擬溫度場的空間分布與目前溫度觀測有相似的分佈。

水力傳導係數表

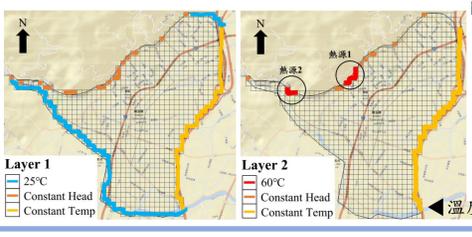
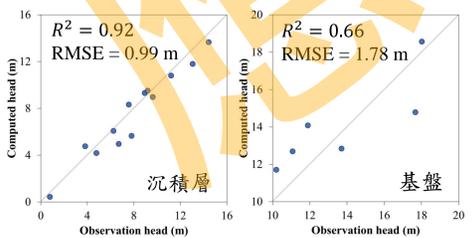
材料	水力傳導係數 K_h (m/d)		
	最小值	最大值	率定結果
礫石	30	300	76.21
極粗、粗及中砂	1	50	3.55
細、極細砂	0.005	10	5.39
粉砂及黏土	0.0001	0.005	0.0002
乾溝層	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁶	2.72×10 ⁻⁶
四稜砂岩	10 ⁻⁵	5	1.19



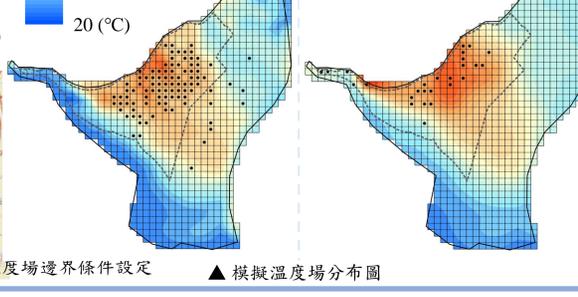
模擬地下水流場分布圖



抽水井及觀測井溫度分布圖



溫度場邊界條件設定



模擬溫度場分布圖

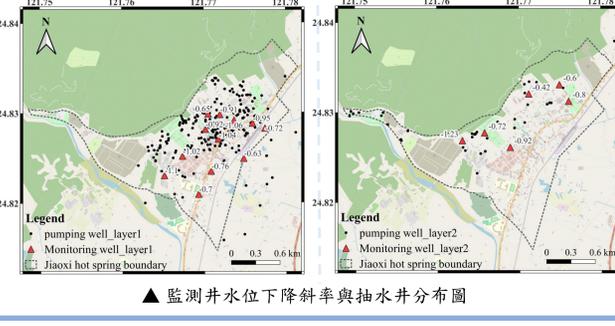
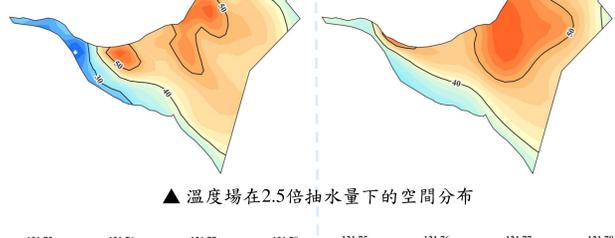
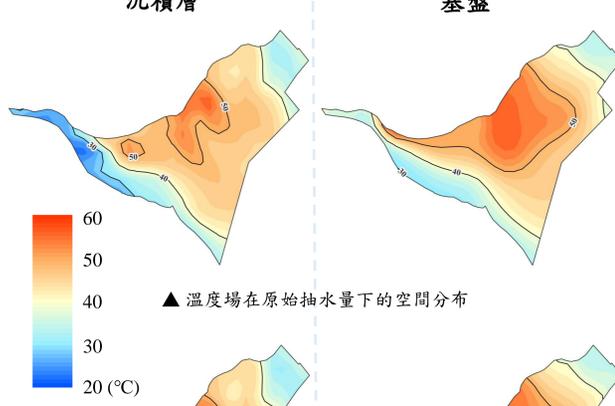
地下水管理

根據已率定完成的數值模型, 探討在不同抽水量下, 礁溪地區的水位變化, 並結合吳益裕等人(2021)對於管理水位的定義, 進一步評估合適的抽水量, 以提供未來溫泉資源規劃之參考。當抽水量增加時, 在溫泉區中心(抽水井較密集)水位下降尤為明顯。同時, 高溫區域的範圍逐漸縮小。

不同抽水比例下, 監測井穩態水位及管理水位燈號

	0.5	1	1.5	2	2.5
JS01	15.10	14.81	14.51	14.21	13.91
JS02	18.77	18.56	18.35	18.14	17.93
JS03	13.12	12.72	12.33	11.92	11.52
JS04	13.95	13.63	13.31	12.98	12.65
JS05	12.20	11.76	11.31	10.84	10.38
JS07	9.79	9.27	8.75	8.21	7.67
JS08	6.52	6.05	5.58	5.10	4.63
JS09	13.17	12.84	12.50	12.14	11.73
JS10	14.63	14.09	13.52	12.91	12.14
JS11	12.12	11.69	11.25	10.79	10.28
JS12	9.42	8.94	8.44	7.93	7.35
JS13	4.48	4.17	3.86	3.54	3.22
JS14	5.98	5.62	5.25	4.87	4.47
JS15	9.96	9.45	8.93	8.38	7.74
9號	5.11	4.75	4.39	4.02	3.66
11號	5.27	4.94	4.60	4.25	3.87
14號	11.23	10.78	10.33	9.86	9.39
16號	8.79	8.29	7.77	7.24	6.71

註: 藍色底為穩態水位高於安全水位
橘色底為穩態水位低於嚴重下限水位



結論

- 運用馬可夫鏈法建立礁溪地區三維地質模型, 並成功整合異質場沉積層與均質場基盤。
- 利用本研究提出選取代表性地質模型的方法, 根據決定係數最高與平均絕對誤差最小的統計特性, 選出具有代表性且最小不確定性的地質模型(模型21)為本研究的代表模型。
- 將抽水量等水文觀測數據輸入代表模型中, 對其進行穩態模式率定, 沉積層模擬水位與實際觀測水位相當一致, 顯示本研究建立之地下水流模式具有代表性。
- 將穩態地下水流場結合MT3DMS套件進行水-熱模擬, 推測礁溪溫泉區熱水來源可能來自靠山區的兩處。
- 本研究採用較嚴格的標準來定義管理水位。結果顯示, 在2020年礁溪地區如果維持目前的抽水量, 尚可持續使用, 但仍需持續觀測與注意。
- 當建立的模式在增加抽水量時, 發現於抽水井密集區水位下降幅度大並造成冷熱水交界退縮。

參考資料

- Dingman, S. L. (2015). Physical hydrology. Waveland press.
- 張寶堂(2004)。礁溪溫泉資源調查與開發之研究。國立臺北科技大學材料與資源工程系碩士論文。
- 陳文福、呂學諭(2010)。礁溪溫泉之生成模式與水位水溫觀測。
- 經濟部水利署(2021)。中華民國109年溫泉監測年報。
- 宜蘭縣政府(2021)。宜蘭溫泉資源探測工作期末報告書。

致謝

- 感謝宜蘭縣政府協助提供研究相關資料