

目錄

- 01 前言、儀器服務平台、近期消息
- 02 微地震應力降估計驗證—利用震源動態模擬
- 04 多模環境噪音雙波束成像層析法：揭示台灣中部增積楔構造
- 06 應用地表變形訊號分析地下水流動模式
- 08 本季成員發表文章 (2025.01~)
- 09 致謝

前言

黃信樺

中央研究院地球科學研究所 副研究員、
台灣地震科學中心 執行秘書

本期內容共有三篇專文分享最近各研究團隊的成果發表，感謝中央大學地球科學學系林彥宇副教授、美國猶他大學林凡奇副教授、美國密西根大學楊筑方博士分享相關成果。

儀器服務平台

- 地震儀器中心儀器庫存查詢 <https://tecip.earth.sinica.edu.tw/>，若您有儀器使用之需求請與儀器中心聯絡。
- TEC 支援各大專院校相關科系之地球物理實習課程。歡迎有需求的授課教師於線上系統提出申請，申請網頁為：<https://tec.earth.sinica.edu.tw/geoclass/>

近期消息

- 114 年 3 月 4 日在交通部中央氣象署舉辦「0121 嘉義大埔地震學術研討會」已圓滿結束，感謝研究學者及與會人士的參與，更多詳情請見會議網站 <https://tec.earth.sinica.edu.tw/activity/0121Dapu/index.html>。

doi: 10.30067/TECNL.202503_(47).0001

微地震應力降估計驗證—利用震源動態模擬

林彥宇

國立中央大學地球科學學系

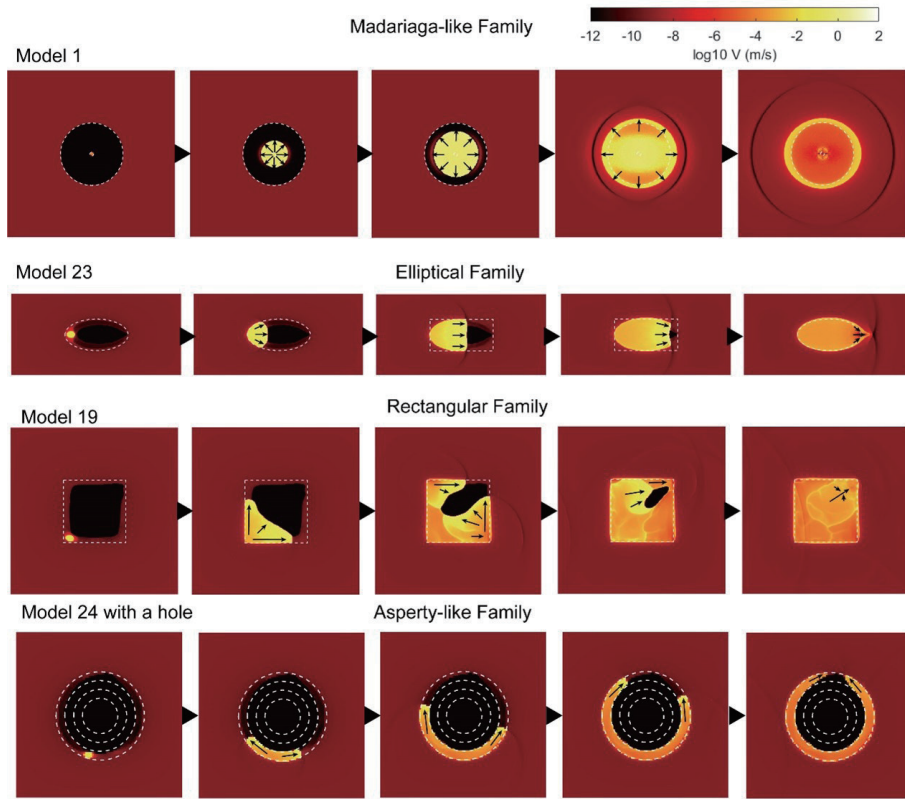
地震震源物理特性為地震學家主要研究目標，其中重要欲知參數包含地震破裂面積(area)、破裂形狀(shape)及破裂時長(duration)等，與上述特性組合之地震源運動學參數「應力降(stress drop)」。相較於大地震可以使用有限斷層法(the finite-fault inversion)與回朔投影法(back projection)估算震源參數及特性，微地震目前則多半假設圓形破裂模型，例如：Brune於1970年提出的圓形破裂模型(Brune, 1970)，及Madariaga於1976年進一步考量破裂速度提出之半動態破裂模型(Madariaga, 1976)。地震學家在過去50年間透過模型假設推估微地震之震源特性獲得重大進展，但一直對於應力降誤差無法掌控。

然微地震破壞行為並非一定是圓形破裂，因此本研究(Lin et al., 2025)利用地震源動態模擬(fault-zone dynamic modeling)技術模擬可能的地震破裂行為，並驗證現行兩個主要估計震源參數的方法—頻譜擬合法(the spectral fitting method)及第二階矩法(the second-moment method)，其估算應力降結果與地震模型真值之差異，進而瞭解圓形破裂模型引入誤差的範圍。本研究分析Madariaga圓形破裂(Madariaga-like)、橢圓破裂(Elliptical)、方形破裂(Rectangular)及地栓破裂(Asperity)模型(如圖一)。研究結果顯示，第二階矩法在不同震源深度與測站展距(D/H)及斷層傾角(dip)的組合，表

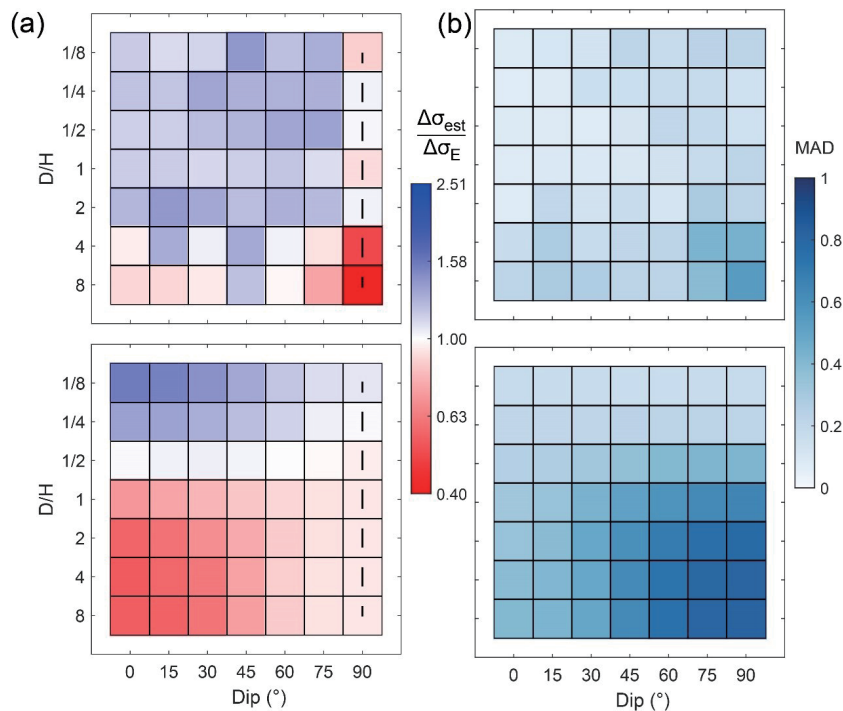
現遠比常用的頻譜擬合法優秀，應力降平均估計誤差約 $\pm 33\%$ (圖二a上圖)，而頻譜擬合法(S波)則有顯著的深度依賴性，應力降平均估計誤差約 $\pm 66\%$ (圖二a下圖)，且第二階矩法離散程度也較頻譜擬合法低(圖二b)。本研究利用地震動態模擬瞭解不同地震學方法對應力降估計之誤差，也發現地震破裂的複雜度將顯著改變應力降估值，進一步影響地震學家對微地震震源物理的理解。

參考文獻

- Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26), 4997–5009. <https://doi.org/10.1029/jb075i026p04997>
- Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(3), 639–666. <https://doi.org/10.1785/bssa0660030639>
- Lin, Y.-Y., Schaal, N., & Lapusta, N. (2025). On Seismological Stress-Drop Estimates for Earthquake Sources Simulated on Rate-and-State Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*. <https://doi.org/10.1785/0120240147>



圖一、地震源動態破裂歷程。顏色表示質點運動速度，超過 0.1m/s 視為地震行為。箭頭表示破裂前緣延伸方向。本圖修改自 Lin et al. (2025) 圖三、四及五。



圖二、(a) 地震學方法求得之應力降與模型應力降比值，上圖為使用第二階矩法；下圖為使用頻譜擬合法。方塊中之顏色表示比值在不同震源深度與測站距離(D/H)及斷層傾角(dip)的組合。(b) 兩種方法估計應力降比值之離散程度，由平均絕對偏差 (Mean Absolute Deviation, MAD) 表示。本圖取自 Lin et al. (2025) 圖十八。

doi: 10.30067/TECNL.202503_(47).0002

多模環境噪音雙波束成像層析法：揭示台灣中部增積楔構造

劉承楠、林凡奇

Department of Geology and Geophysics, University of Utah

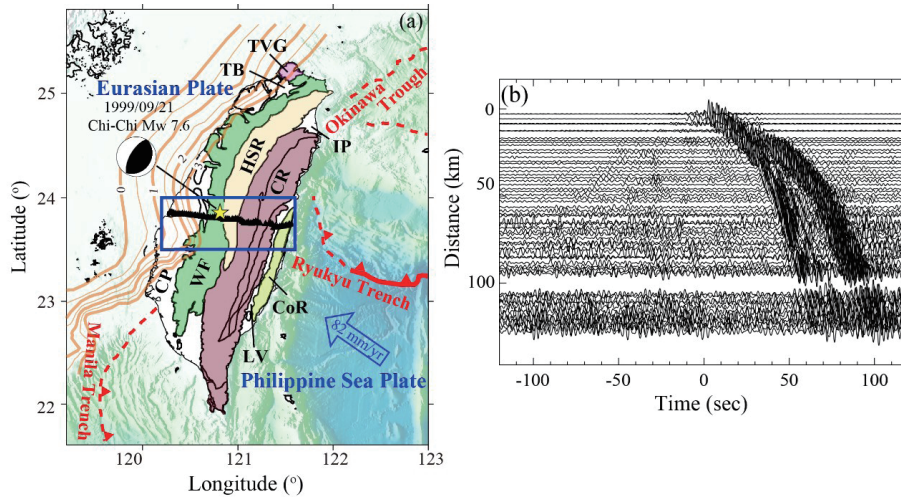
台灣是世界上最活躍的造山帶之一，活躍的板塊擠壓與地殼變形造就了台灣擁有複雜的地形與地質構造。為了更清晰地描繪台灣中部造山構造，我們利用中台灣東西向的密集地震陣列，及環境噪音層析成像技術(Ambient Noise Tomography, ANT) (圖一)，建構了一個高解析度的二維剪切波速模型(圖二)，並對已知地質結構以及地震分佈進行比較。

在研究過程中，我們發現基頻(fundamental mode)與高階模式(higher-mode)雷利波共同存在(圖一)，其中高階模式雷利波主要存在西部的沿海平原區。為了更準確地測定局部相速度，我們開發了一種多模雙波束聚焦方法(multimode double-beamforming method)，針對 2 至 5 秒週期範圍內的雷利波進行分析，獲得陣列沿線的相速度分布。在相速度反演過程中，我們針對每個測點，將所有可用的基頻與高階模式相速度共同反演，並應用貝葉斯方法(Bayesian-based inversion method)來反演一維速度結構。最終，我們將所有獨立的一維模型整合，以構建從地表至約 10 公里深度的高解析度二維剪切波速模型。我們發現，反演後建立的二維剪切波速模型清楚地描繪出台灣中部主要構造邊界及斷層幾何特徵，並驗證了先前提出的前楔(pro-wedge)與後楔(retro-wedge)造山模型。同時，該模型提供了

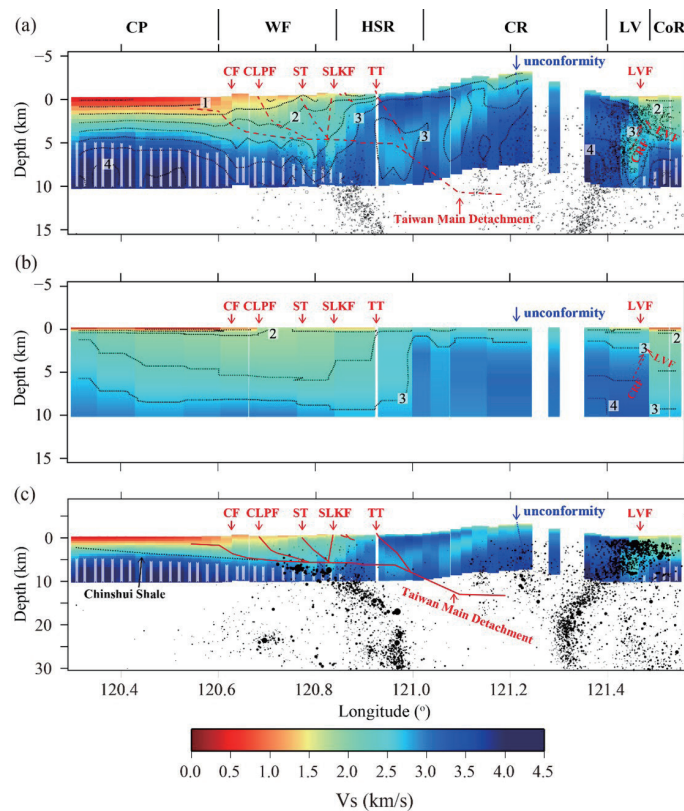
新的視角，有助於深入理解該區域的地殼構造與地震危害特性。透過本研究，我們不僅強化了對台灣造山帶動力學機制的認識，也為區域性地震風險評估提供了重要的地球物理依據。

參考文獻

- Huang, H.-H., Wu, Y.-M., Song, X., Chang, C.-H., Lee, S.-J., Chang, T.-M., & Hsieh, H.-H. (2014). Joint Vp and Vs tomography of Taiwan: Implications for subduction-collision orogeny. *Earth and Planetary Science Letters*, 392, 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.026>
- Liu, C.-N., Lin, F.-C., Huang, H.-H., Wang, Y., & Gkोगkas, K. (2024). Multimode ambient noise double-beamforming tomography with a dense linear array: revealing accretionary wedge architecture across Central Taiwan. *Geophysical Journal International*, 239(1), 467–477. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae283>
- Yue, L.-F., Suppe, J., & Hung, J.-H. (2005). Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan ($M_w=7.6$). *Journal of Structural Geology*, 27(11), 2058–2083. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.05.020>



圖一、(a) 台灣的構造地圖與本研究使用的地震儀測站 (黑色三角形)。主要地質區域：CP(濱海平原)、WF(西部麓山帶)、HSR(雪山山脈)、CR(中央山脈)、LV(花東縱谷)、CoR(海岸山脈)、TVG(大屯火山群)、TB(台北盆地)、IP(蘭陽平原)。星號標示 1999 年集集大地震 (Mw 7.6) 震央，海灘球表示其震源機制。棕色線代表前陸盆地深度等高線。藍色矩形框示範本研究的重點區域 (b) 2 至 5 秒垂直向互相相關函數 (Cross-Correlation Functions)，顯示西海岸邊 M02 測站與其他測站之間的信號範例。



圖二、(a) 反演得到的 2-D 剪力波波速模型，垂直方向較水平放大 2 倍以加以顯示各區域細部的構造。黑色虛線標示 0.5 km/s 等速線，開放圓點顯示 1991 至 2020 年的背景地震分布。灰色束線區間標示測量誤差較高的區域。紅色虛線表示台灣西部的構造與斷層 (修改自 Yue et al., 2005)。CF(彰化斷層)、CLPF(車籠埔斷層)、ST(大茅埔-雙冬斷層)、SLKF(水里坑斷層)、TT(地利斷層)、LVF(縱谷斷層系統)。(b) 與 (a) 相同，但為 Huang et al. (2014) 參考模型，比較 (a) 與 (b) 可以明顯看出新模型解析度較高。(c) 與 (a) 相同，但未進行垂直放大。黑色圓點標示與 (a) 相同的背景地震分布，黑色虛線則代表濱海平原下方的清水頁岩及中央山脈西側的佳陽層。

doi: 10.30067/TECNL.202503_(47).0003

應用地表變形訊號分析地下水流動模式

楊筑方^{1,2}、戚務正¹、柯建仲³、林欽仁¹

¹ 中央研究院地球科學研究所

² 美國密西根大學地球與環境科學系

³ 財團法人中興工程顧問社

導致地表變形的肇因眾多，包含事件型的地震活動、時序型的地體構造演變及長時間抽水產生的地層下陷行為等。近年來，地層下陷的觀測大多聚焦於地表變形量之觀測，對於如何瞭解與量化抽水導致之含水層體積變化，仍是具高度挑戰性之議題。有鑑於此，本文提出一套結合廣域地球物理觀測與現地抽水試驗之整合技術，透過地下水抽取所造成的地表變形時序變化來探討其機制。在傳統之含水層水力學中，定量抽水試驗的水位洩降時序變化可用於推估含水層系統及其流動模式。然而，僅依賴一至兩口井的數據，難以提供異質性場址的詳細空間資訊。因此，本研究提出以多個密集分布的地震儀監測地表傾斜，以提高空間解析度。

本研究於新北市雙溪試驗場址周圍設置九個寬頻地震儀，距離井口 3 至 38 公尺不等，並測量 24 小時定量抽水過程中水壓擾動所引起的地表傾斜變化。結果顯示，地震儀偵測的傾斜方向受到局部異質性、場址內裂隙及層面傾角的影響。抽水期間，水位下降導致孔隙水壓降低，引起地層下沉，進而產生地表形變與傾斜。傾斜量隨著距離抽水井的增加而減小，並與地下水面洩降錐 (depression cone) 的解析解相符。此外，地層下沉、水位洩降、地表垂直變形及地面傾斜量之間呈線性關係。

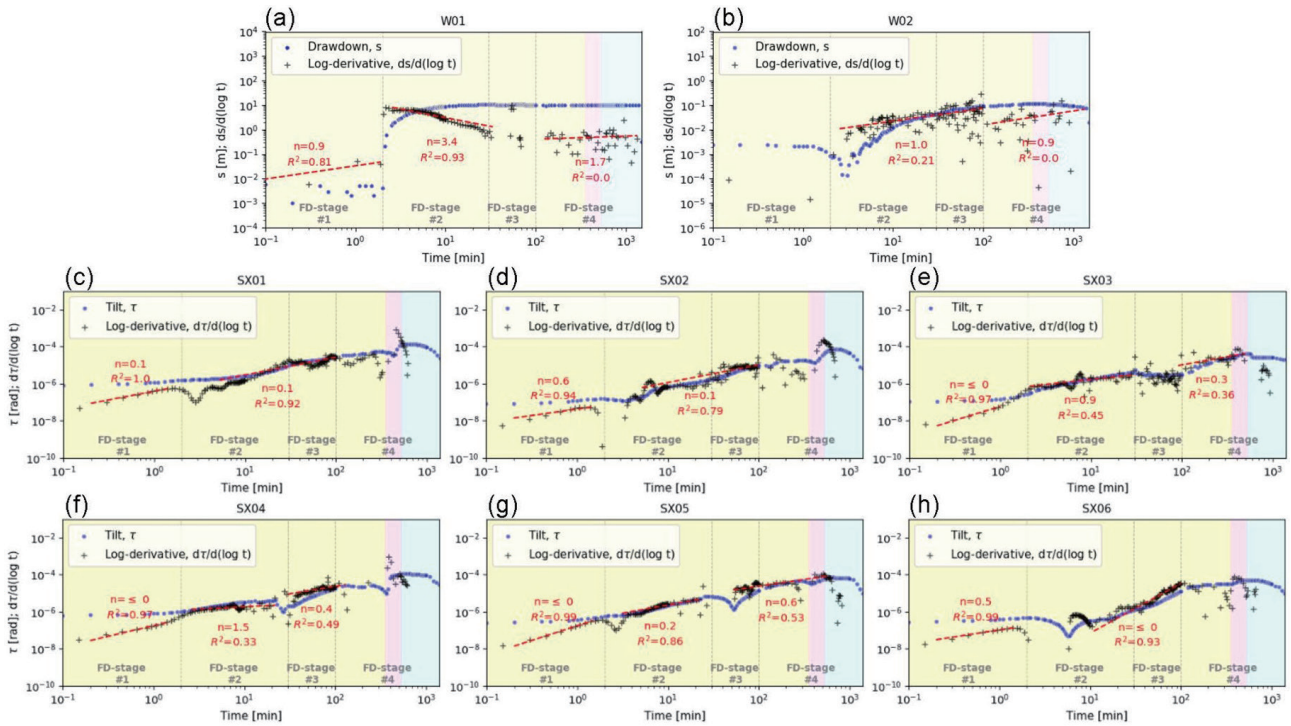
本研究利用各測站的傾斜量(τ)，透過對數導數時間序列 [$d\tau/d \log(t)$] 分析水流維度 (flow dimension, n) 的時空變化 (圖一)。結果顯示，地震儀推估的水流維度與水位洩降所推估的結果在空間分布上具有一致性。綜合水文地質調查與水流維度分析，顯示該地下水系統兼具球狀 ($n=3$, spherical) 與次圓柱狀 ($1 < n < 2$, sub-radial) 水流，且遠處水頭受限於不透水邊界，亦受較深處的不透水地層及陡傾裂隙與層面所控制 (圖二)。研究結果證明，在抽水井周圍安裝多個緊密間隔的寬頻地震儀，能有效提高流動模式的空間解析度，並有助推估地下水網絡的水文地質條件。未來，此方法亦可應用於裂隙與地層結構複雜的火山區域，以深化對地下水系統的理解。

參考文獻

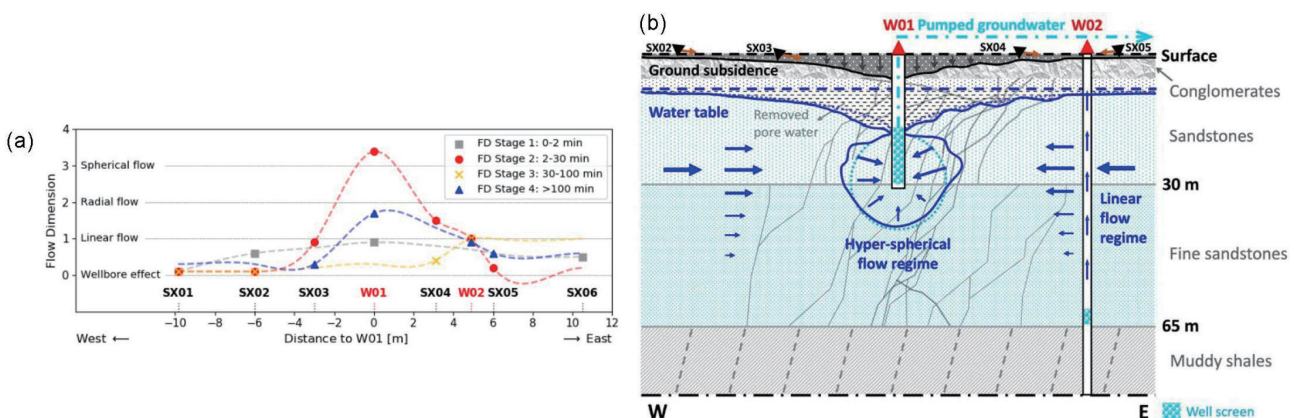
- Chi, W.-C., Yang, C.-F., Wege, S., Lin, C.-J., & Ke, C.-C. (2024). Transient ground bulge derived from a dense broadband seismic array during an aquifer step-drawdown pumping test. *Journal of Hydrology*, 628, 130595. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130595>
- Yang, C.-F., Chi, W.-C., Ke, C.-C., & Lin, C.-J. (2024). Application of seismically derived tilt signals to characterize groundwater flow regimes:

An example from a constant-rate pumping test in Taiwan. *Journal of Hydrology*,

645, 132188. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132188>



圖一、透過對數導數時間序列 [ds/d log(t) 或 dτ/d log(t)] 分析地下水水流維度的變化。(a) 與 (b) 分別顯示抽水井 W01 和監測井 W02 的水位洩降時間序列。(c) 至 (h) 則分別對應寬頻地震站 SX01、SX02、SX03、SX04、SX05 和 SX06 的地傾量時間序列。藍色標記代表水位洩降量或地傾量時間序列 (s, 公尺或 τ, rad)，黑色標記則為相對應的對數導數時間序列。紅色虛線為不同水流維度 (flow dimension, FD) 階段的迴歸擬合線，其中 n 表示水流維度，R² 表示擬合對數導數時間序列的相關係數。灰色垂直虛線標示出各 FD 階段的區隔，而淺黃色、粉紅色和藍色陰影則分別標示地表變形的第一、第二及第三傾斜階段。



圖二、(a) 雙溪試驗場址於定量抽水試驗期間水流維度之時空變化。虛線曲線顯示大致沿東西向的水流維度剖面。x 軸表示從抽水井到各測站的距離。(b) 雙溪試驗場址在第二 FD 階段的剖面視角下之流動模式概念模型。藍色箭頭表示流動模式中的潛在流向，粗長箭頭表示相對較高的流量。灰色虛線標示地層的傾角。抽水井井篩附近的裂隙網絡導致超球狀流 (hyper-spherical flow)，而監測井較深處的開篩則可能促使垂直線性流。SX04 附近的流動模式處於抽水井與監測井之間的過渡區，呈現雙線性流 (bilinear flow)。此外，地下水亦可能沿著裂隙的傾斜方位穿越東西向剖面流動。藍色實線與黑色實線分別表示水位下降與地層下沉。

本季成員發表文章 (2025.01~)

- Chowdhury, S., Walia, V., Lin, S.-J., **Fu, C.-C.**, & Lee, H.-F. (2025). Non-linear analysis of soil ^{222}Rn time series recorded at Jiaosi in north-east Taiwan for possible earthquake precursor study. *Environmental Earth Sciences*, 84(3), 77. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12100-y>
- Dang, M.-Q., Hsu, F.-H., Su, C.-C., Wang, S.-J., **Fu, C.-C.**, & Lin, I.-T. (2025). Investigation of seasonal variations in submarine groundwater discharge using radium isotopes under drought conditions in northwestern coastal Taiwan. *Journal of Hydrology*, 649, 132450. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132450>
- Fu, C.-C.**, Jhuang, H.-K., Ho, Y.-Y., Tsai, T.-C., Lee, L.-C., Lin, C.-H., Lin, C.-R., Walia, V., & Lee, I.-T. (2025). A Study of Lithosphere–Ionosphere Seismic Precursors from Detecting Gamma-Ray and Total Electron Content Anomalies Prior to the 2018 M_L 6.2 Hualien Earthquake in Eastern Taiwan. *Remote Sensing*, 17(2), 188. <https://doi.org/10.3390/rs17020188>
- Han, W.-C.**, & Chen, L. (2024). Marine Geothermal Research in Taiwan: An Overview. *Marine Research*, 4(2), 75-94. [https://doi.org/10.29677/MR.202412_4\(2\).0005](https://doi.org/10.29677/MR.202412_4(2).0005)
- Ho, K.-C., **Ko, J. Y.-T.**, **Huang, H.-H.**, & **Lee, S.-J.** (2025). A novel approach to tsunami prediction using ambient noise-derived Green's functions. *Geophysical Research Letters*, 52(5), e2024GL113971. <https://doi.org/10.1029/2024GL113971>
- Kunath, P., Talling, P. J., Lange, D., **Chi, W.-C.**, Baker, M. L., Urlaub, M., & Berndt, C. (2025). Ocean-bottom seismometers reveal surge dynamics in Earth's longest-runout sediment flows. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 147. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02137-z>
- Liao, C.-F., & **Chen, Y.-N.** (2025). Characteristics of Higher-Mode Ambient Noise Rayleigh Waves in Taiwan: Insights from Multicomponent Interferometry. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220240192>
- Lin, C.-R., von Specht, S., **Ma, K.-F.**, Ohrnberger, M., & Cotton, F. (2025). Analysis of saturation effects of distributed acoustic sensing and detection on signal clipping for strong motions. *Geophysical Journal International*, 241(2), 971–985. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaf089>
- Lin, Y.-Y.**, Schaal, N., & Lapusta, N. (2025). On Seismological Stress-Drop Estimates for Earthquake Sources Simulated on Rate-and-State Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*. <https://doi.org/10.1785/0120240147>
- Lin, Y.-Y.**, **Wen, Y.-Y.**, Chen, C.-T., & Yen, Y.-T. (2025). Strong-motion characteristics of two 2022 M 6.5+ disastrous earthquakes in the southern longitudinal valley, Taiwan. *Earth, Planets and Space*, 77(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02128-y>

- Mittal, H., Pal, S., Kumar, R., Saini, A., **Wu, Y.-M.**, Ammani, A., Patel, R. C., Sandeep, & Mishra, O. P. (2025). India's Earthquake Early Warning Systems: A Review of Developments and Challenges. *Surveys in Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s10712-025-09875-x>
- Shyu, J. B. H.**, Hsieh, P.-K., Ramos, N. T., Chiang, H.-W., Liu, S.-C., & Shen, C.-C. (2025). Uplifted late Quaternary marine terraces along the southern coast of Bohol Island, central Philippines, and their active tectonic implications. *Geoscience Letters*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40562-025-00380-y>
- Wu, H.-Y.**, Liu, H.-C., Kao, L.-C., **Ching, K.-E.**, **Chen, C.-C.**, You, C.-F., Yi, T.-C., Chen, Y.-H., Wu, B.-L., & Chen, C.-J. (2025). Potential geological risks from mud diatremes in the orogen regime of Southwestern Taiwan. *Scientific Reports*, 15(1), 7666. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91915-y>
- Wu, Y.-M.**, Lin, Y.-H., Yang, B. M., & Ke, S.-S. (2025). Performance of the P-alert real-time shakemaps system and onsite warning during the 2025 M_L 6.4 Dapu earthquake. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 36(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s44195-025-00086-w>

ACCEPTED

- Su, C.-M., **Wen, Y.-Y.**, & Chen, C.-T. (2025). Fast report: Strong-motion characteristics of 2025 M_L 6.4 Dapu earthquake, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*.

致謝

本季刊由TEC辦公室成員陳卉瑄主任、馬國鳳特聘研究員、黃信樺副研究員、楊詠甯、黃淑真及吳美芳協助編輯，第四十七期內容感謝國立中央大學地球科學學系林彥宇副教授、美國猶他大學地質與地球物理系林凡奇副教授、美國密西根大學地球與環境科學系楊筑方博士提供。