

臺灣地區112年地震前兆監測資料彙整及分析

子計畫一

三分量地磁資料分析

顏宏元 羅祐宗 陳俊榕 簡立凱 陳冠廷

中華民國地球物理學會

摘要

九二一大地震後，經檢視臺灣地區地磁連續觀測資料（全磁場強度）發現，位於車籠埔斷層兩端的鯉魚潭及曾文地磁觀測站，都觀測到磁力異常訊號，這些異常訊號與地震的發生有時間上的巧合。一般認為，當岩層受到應力作用而產生裂隙，地層內所含的帶磁礦物會散發在空間中，造成地球磁場的變化。計畫主要為檢視臺灣地區地磁連續觀測網之三分量地磁資料品質，同時也分析地磁連續觀測網資料，以了解地磁場強度改變與地震活動的關聯性。

關鍵詞：地磁、地震活動

Abstract

After 921Chi-Chi earthquake, numerous magnetic anomaly signals were observed in the northern and southern parts of the Chelungpu fault, and it is coincided with the time of Chi-Chi earthquake occurred. It is generally believed that the magnetic minerals contained in the formation will be dispersed in space, causing changes in the geomagnetic field. This project includes not only checking the quality of the magnetic observation network data, but also analyzing 3-components geomagnetic observations associated with seismicity and changed in tectonic stress.

Key Words: Geomagnetic、seismicity

壹、前言及研究目的

在 1999 年九二一集集大地震後，我們發現距車籠埔斷層北端 8 公里的鯉魚潭磁力站，地磁總強度在地震發生前一個多月就紀錄到擾動的訊號，振幅達到 180 nT，這些擾動訊號的振幅逐漸變小且在同年 10 月 22 日嘉義大地震發生的同時，這些擾動訊號就沒有被偵測到，這些巧合讓我們認為地磁場強度異常應該和大地震的發生有關；另外，位於臺南的曾文地磁觀測站，似乎也記錄到一些擾動的訊號，研判與嘉義大地震有關(Yen et al., 2004)。

臺灣地磁連續觀測網，大致上可以分為三個時期：

(1) 1988~2001 年由中央研究院地球科學研究所建置的臺灣地區地磁連續觀測網，站內安裝 G-856 質子進動磁力儀(Proton-Precession magnetometer, G856)，每 5 分鐘觀測地磁全磁場強度資料存於儀器的硬碟中，每兩個月由技術人員前往各站下載資料。

(2) 上述連續地磁觀測網記錄到地磁場強度異常與集集、嘉義大地震發生有關的一些擾動的訊號(Yen et al., 2004)，這些紀錄都是技術人員於地震後前往地磁觀測站下載資料，而無法即時監測到地磁擾動訊號。2002~2006 年中央大學改造中研院地球科學研究所地磁連續觀測網，共有 12 個觀測站，使用的儀器為加拿大 GEM 公司所生產之 GSM90F 型磁力儀，取樣率為 1Hz，記錄資料傳送至中央大學的記錄中心。

(3) 2007 年後，中央大學將所建置的「臺灣地區地磁場連續觀測網」移轉給中央氣象署。2014 年起為了加強對池上斷層的監測，於池上地區增設了池上(CS)地磁觀測站。

由於儀器老舊，地磁連續觀測網陸續有許多測站出現了資料中斷的現象。自 2018 年開始進行地磁觀測儀器更新，將原量測全磁場的儀器汰換為三分量磁力儀，此儀器由日本 TIERRA TECNICA 公司所製造之儀器，取樣率為 1Hz，包含接收器、前置放大器、主機和 GPS，用網路將所觀測的資料即時傳輸到紀錄中心。

本計畫主要為檢視地磁連續觀測網之地磁觀測網資料品質，同時也分析全省三分量地磁連續觀測網資料，以了解地磁場強度改變與地震活動的關聯性。

貳、研究方法

地球磁場的變化(微脈動)是和地震活動、洋流及電離層潮汐等有關，臺灣是研究地磁場微脈動的最佳地區。2018 年中央氣象署陸續將原量測全磁場的儀器汰換為三分量磁力儀，重新建置臺灣地區三分量地磁連續觀測網，測站分布如圖一。地震中心同仁辛苦的維護該觀測網的正常運作，提供學界高品質的地磁資料進行分析研究。原日月潭觀測站儀器遭雷擊而故障，加上有部分測站所記錄到的資料出現不穩定的現象，該站已於去年(2022)遷移至暨南國際大學校園一隅。本年度除了檢視各地磁觀測站的資料品質和穩定性外，另一個重要的工作就是繼續分析地磁資料與地震活動的相關性。

分析地磁資料與地震活動的相關性，將選擇最靠近震央的地磁站紀錄與資料品質較佳的地磁參考站紀錄直接相減，看看是否有偵測到地震前後的地磁異常？採用 Liu et al. (2006) 之方法，計算磁力站每日地磁場強度最大值與最小值進行相減，得到各站日變化振幅，並比較各磁力站與金門或馬祖參考站之日變化振幅的比值。因磁力的日變化主要受到太陽風與地磁層的影響，在小區域中變化量理論上應該相似，因此各測站與參考站的比值應該大致上接近於 1。以 1999 年 921 集集地震為例，選取地震前後 15 天的資料作圖，發現 LY 與 TW (靠近車籠埔斷層南北端的兩個測站) 比值的分佈有明顯的偏離背景分佈。Liu et al. (2006) 認為這個偏移情形來自於孕震區的導電性改變所產生之電流進而影響地球磁場。

日本在研究地震前兆的發生大多使用超低頻法 (Ultra-Low-Frequency, ULF)，此方法是將在時間域所得到的三分量磁力資料，經過 FFT 轉換成頻率域，再選擇頻率域中的 0.01~0.03Hz 為研究範圍。研究發現地震對地磁的影響在 Z 方向最為明顯 (Hattori et al., 2004)。由於地震對地磁的影響在 Z 方向最為明顯，而 H 向分量大多維持不便，所以將三分量的地磁觀測資料之 Z 方向分量除以 H 方向分量，根據比值改變趨勢探討與發生地震的關聯性。本計畫嘗試利用超低頻法 (Ultra-Low-Frequency, ULF)，就 2022 年 9 月 18 日發生在臺東池上鄉規模 6.8 之地震事件進行分析。

參、結果與討論

(1) 檢視磁力觀測站的紀錄

臺灣地區三分量地磁觀測站的取樣率是 1Hz，每一個觀測站一年總計有 3 千多萬筆紀錄。若以相鄰兩點的全磁場強度變化量超過 10 nT 之個數，來檢視 1 至 10 月各測站觀測資料品質。馬祖 (MT) 和金門 (KM) 的資料品質最佳 (圖二及圖三)，雖然地磁場總強度有突跳的情形，但其振幅和次數對資料分析的影響不大。其他在本島及蘭嶼觀測站的資料，因儀器故障、更換觀測地點及網路傳輸中斷的因素，造成資料中斷及不明的干擾 (圖四至圖十三)。

位於桃園市復興區的爺亨 (YH) 地磁觀測站，一直是資料傳輸穩定且觀測資料品質佳的地磁站。今年 1 至 10 月僅有 10 次前後兩點間的全磁場強度變化量超過 10 nT (圖四)。位於苗栗鯉魚潭水庫旁的鯉魚潭 (LY) 觀測站，1 至 7 月都沒有前後兩點的全磁場強度變化量超過 10 nT，也是資料傳輸穩定且觀測資料品質佳的地磁站。不過自 8 月起，資料開始受到嚴重的擾動且持續到 10 月底仍然沒有恢復正常觀測 (圖五)。遷移至暨南國際大學的地磁觀測站 (CN)，其資料品質在 3 月下旬開始受到嚴重的擾動，4 月初因儀器故障而沒有任何的紀錄，不過在 7 月份儀器修護且恢復正常的運作，相鄰兩點的全磁場強度變化量都沒有超過 10 nT (圖六)。過去資料品質非常好的曾文 (TW) 觀測站，在 4 月上旬到 7 月上旬，共發生 4 次資料不明原因的擾動情況，7 月中旬過後，觀測資料又恢復正常 (圖七)。去(2022)年在 4 月底到 6 月間，曾發生相鄰兩點的全磁場強度變化量超過 10 nT 的次數竟達到 57935 個，經檢視儀器的傾斜情況發現，曾文站的儀器不論在東西、南北向及總傾斜量都有不規則的傾斜，但其傾斜量均沒有超過 300 角秒 (arc second)，會進一步了解造成曾文地磁站觀測資料受擾動的可能原因。恆春 (HC)

地磁觀測站的日變化振幅較臺灣其他各觀測站大，應該是「海岸效應」所造成的 (Chen et al., 2016)，除了 9、10 月兩度資料傳輸中斷外，該站整體觀測資料品質相當的不錯 (圖八)。

去(2022)年受到明顯干擾的內城 (NC) 觀測站，2023 年 1 至 10 月的所記錄到的資料品質不錯 (圖九)，雖然有相鄰兩點的全磁場強度變化量超過 10 nT，但受干擾為短暫的、次數不多且振幅也不大，推測干擾源就來自觀測站附近。裝設在花蓮大漢技術學院操場一隅的新城 (XC) 觀測站 (圖十)，除了 2、3 月的觀測資料受到干擾外，該站整體觀測資料品質也是相當的不錯。裝設在池上斷層附近的池上 (CS) 地磁站記錄到高品質的觀測資料 (圖十一)，不過在 8 月底因光纖網路中斷而無法回傳資料。位於臺東大學知本校區的知本 (ZB) 觀測站，除了 1 月中旬有一天的觀測資料受到不明原因的干擾外，1 至 10 月的所記錄到的資料品質不錯 (圖十二)。蘭嶼 (LN) 觀測站的儀器是安裝在蘭嶼氣象站的後方樹林內，該站所裝設的儀器自今年 2 月起就恢復正常的運作，前後兩點間的全磁場強度變化量超過 10 nT 少於 100 次 (圖十三)。

池上觀測站曾於 1 月 11 日中午有突然有超過 500 角秒的傾斜紀錄，各地磁分量及總強度也都受到影響 (圖十四)。12 日以後的地磁場總強度、各分量強度及儀器的傾斜就趨於穩定的紀錄，直到 8 月底因傳輸網路有問題而造成資料中斷。另外在新城 (XC) 觀測站於 2 月底，東西向突然有 1500 角秒的傾斜紀錄 (圖十五)，各地磁分量及總強度也都受到影響，如圖十所示，比較特別的現象是東西及南北的傾斜立刻回到 0 角秒。雖然在花蓮地區常發生有感地震，但推測這次傾斜原因應該與地震活動無關。

整體而言，除了鯉魚潭 (LY) 觀測站、極短時間的擾動、傳輸網路中斷外，整個觀測網維運及地磁場觀測資料品質都相當不錯。

(2) 地磁場強度改變與地震活動的關聯性

A. 2022 年 9 月 18 日臺東池上地震事件

採用超低頻法及日變化振幅比值法，就去年臺東池上鄉規模 6.8 之地震事件，分析地磁資料與地震活動的關聯性。

選擇外島的馬祖 (MT)、最北邊的內城 (NC) 及近震央的池上 (CS) 等 3 個地磁觀測站，並以資料品質最佳的馬祖 (MT) 站為參考對比站。將在時間域所得到的三分量磁力資料，經過 FFT 轉換成頻率域中的 0.01Hz 訊號，再將三分量的地磁觀測資料之 Z 方向分量除以 H 方向分量，即求得 0.01Hz 時之垂直與水平改變量的比值，看看是否有極化指標出現明顯改變 (Hattori et al., 2004)。圖十六是馬祖地磁站的觀測資料，選取 0.01Hz 之垂直與水平改變量的比值，圖中黑色線為每日的比值；藍色線則為一週比值的平均值 (週均值)。馬祖參考站垂直與水平改變量的比值，2022 年的週均值在 0.07 至 0.2 之間變化，1 至 3 月的比值呈現上升；4 到 10 月比值在 0.15 上下變化；11 到 12 月間的比值開始變小至 0.75。比較馬祖站和池上站的垂直與水平改變量比值 (圖十七)，整年度兩個測站的改變量起伏幾乎都是相同的，唯有在 9 月間有些差異；這種差異在內城站和池上站的垂直與水平改

變量比值也可以發現（圖十八），似乎可以對應到池上地震的發生。

日變化振幅比值法選擇東部離震央較近的池上（CS）、知本（ZB）兩個測站，以馬祖（MT）做為參考站，以 2022 年整年的資料當作背景值，20 天為一窗格計算，每次以 1 天移動窗格。以地震當天為 0 天，取前 60 天及後 60 天進行分析。知本和池上兩站的中間值分別為 0.7 和 0.8，一個標準偏差均為 ± 0.25 ，日變化的比值較多分布在一個標準差的下方。臺東知本站在地震前後 60 天的日變化比值並沒有改變的情形，而池上站則在地震前 20 天的日變化比值也有變小的趨勢（圖十九）。兩個近震央地磁觀測站日變化比值都有變小的趨勢，是否與 0918 池上地震有關值得進一步探討。

B. 2023 年 10 月 11 日花蓮富里地震事件

今（2023）年 10 月 11 日在花蓮富里發生規模 5.8 的地震，震源深度為 17 公里。因池上地磁站在 9 月底沒有觀測資料，所以選取臺東知本（ZB）和位於北部的爺亨（YH）地磁觀測站，仍以資料品質最佳的馬祖（MT）站為參考對比站，進行日變化振幅比值法分析。以 2023 年 1-9 月的資料當作背景值，20 天為一窗格計算，每次以 1 天移動窗格。以地震當天（10 月 11 日）為 0 天，取前 80 天及後 10 天進行分析。臺東知本站中間值為 0.7，一個標準偏差均為 ± 0.3 ，日變化的比值較多分布在一個標準差的上方。對照臺灣北部的爺亨（YH）地磁觀測站，中間值接近 1 且標準偏差在 ± 0.15 之內，在地震前 50 天之日變化的比值都沒有偏移現象（圖二十）。

（3）地磁場強度頻譜分析

地球磁場的變化（微脈動）是和地震活動、洋流及電離層潮汐等有關，各個影響因素會反映在哪一個波段？利用地磁觀測資料進行地震前兆分析時，哪一個週期才是孕震期間所衍生的前兆訊號？本研究選擇外島的馬祖（MT）、位於地震活動較不活躍的爺亨（YH）及近海邊且地震活躍的知本（ZB）等 3 個地磁觀測站，以 1 至 10 月的資料初步探討臺灣地區地磁資料的時頻特性。

圖二十一分別是馬祖（MT）及爺亨（YH）地磁站的時頻圖，兩個站都可以很清楚看到 6 小時、8 小時、半天及全天的主要頻率。圖二十二是臺東知本（ZB）地磁站的時頻圖，在馬祖和爺亨兩站清楚的 6 小時及 8 小時的頻段，在知本站卻沒有特別的明顯，值得進一步探討是否因海岸或緯度效應所造成的？圖二十三及圖二十四分別是將爺亨（YH）及知本（ZB）兩個觀測站 1 至 10 月的資料，直接與馬祖（MT）觀測站的資料相減，即扣除緯度效應而求得相對馬祖站的日變化。就 1 至 10 月相對馬祖站的日變化進行時頻計算（圖二十五），爺亨站相對馬祖站的日變化仍可以清楚的看到 6 小時、8 小時、半天及全天的主要頻段，但在知本站相對馬祖站的日變化卻呈現不同的頻譜，似乎還有其他影響地磁強度的因素。

地震活動、洋流及電離層潮汐等都會影響地磁場強度，臺灣地區地震活動頻繁且四周有特殊的海域地形，所以有必要就各觀測站三分量的地磁及傾斜資料進

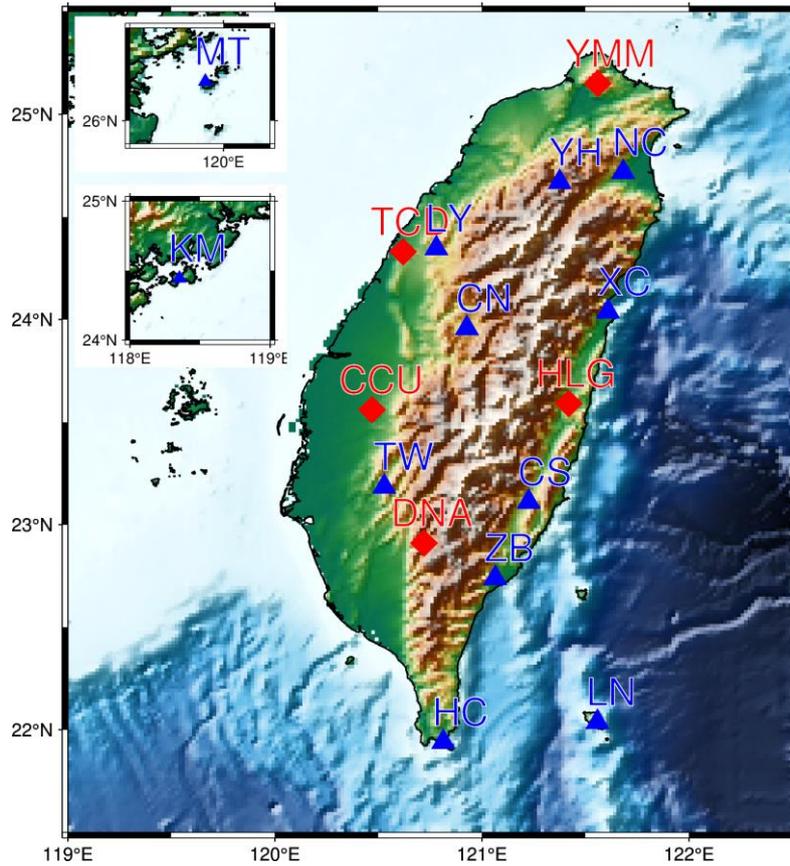
行頻譜分析。另外也可以就日變化差異及日變化比值法的結果進行頻譜分析，更有助於了解孕震期間所可能衍生的前兆訊號。

肆、誌謝

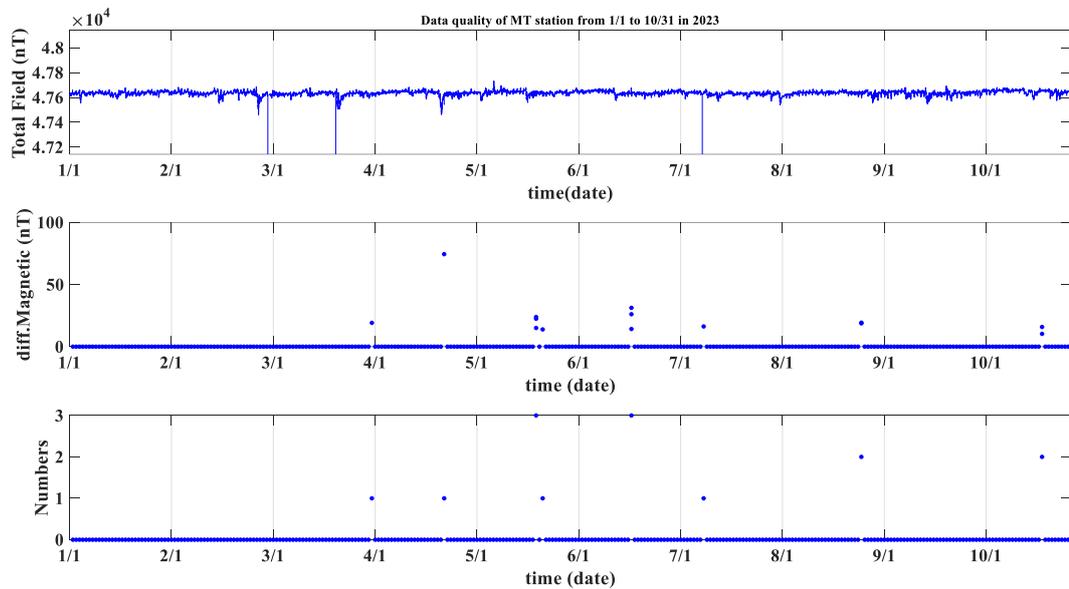
本計畫由中央氣象署提供經費，地球物理課同仁協助測站維運及資料處理，在此表達最誠摯的謝意。

參考文獻

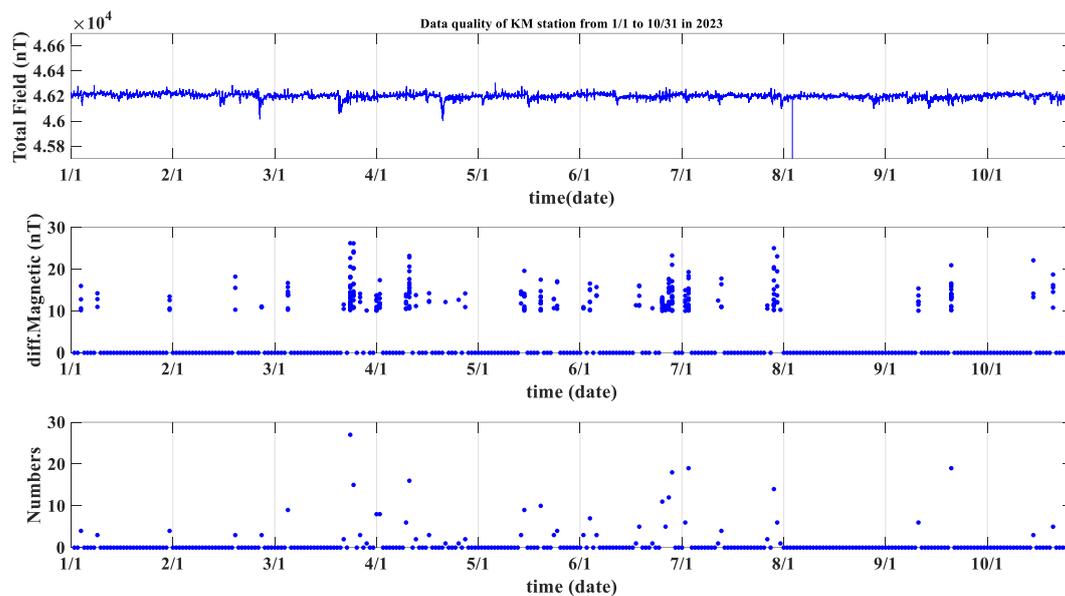
- Chen, C. R., H. Y. Yen, C. H. Chen, Y. Y. Lee, Y. T. Lo, T. C. Shin (2016), Preliminary studies on Unusual Magnetic Diurnal Variation on Hengchun Peninsula, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 27, 21-28.
- Hattori, K., 2004. ULF Geomagnetic Changes Associated with Large Earthquakes. *TAO*, Vol. 15, No. 3, 329-360.
- Liu, J. Y., C. H. Chen, Y. I. Chen, H. Y. Yen, K. Hattori, K. Yumoto (2006). Seismo-geomagnetic anomalies and $M \geq 5.0$ earthquakes observed in Taiwan during 1988–2001. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 215–222.
- Yen, H. Y., C. H. Chen, Y. H. Yeh, J. Y. Liu, C. J. Lin and Y. B. Tsai (2004). Geomagnetic fluctuations during the Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Earth, Planets and Space*, 56, 39-45.



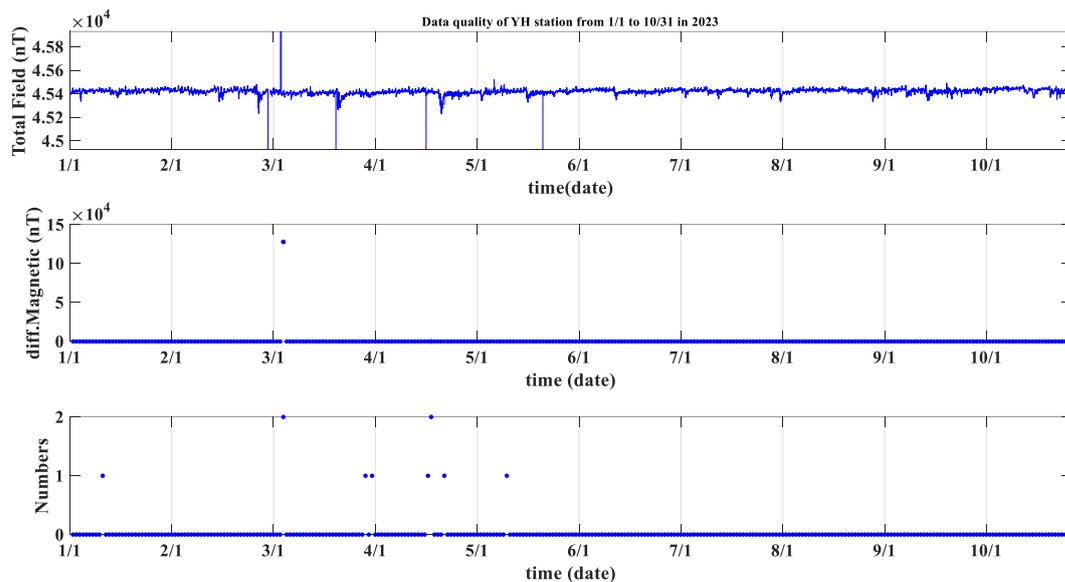
圖一、臺灣地區三分量地磁觀測站的位置圖，藍色三角形為中央氣象署的測站；紅色菱形是中研院地球所的測站。



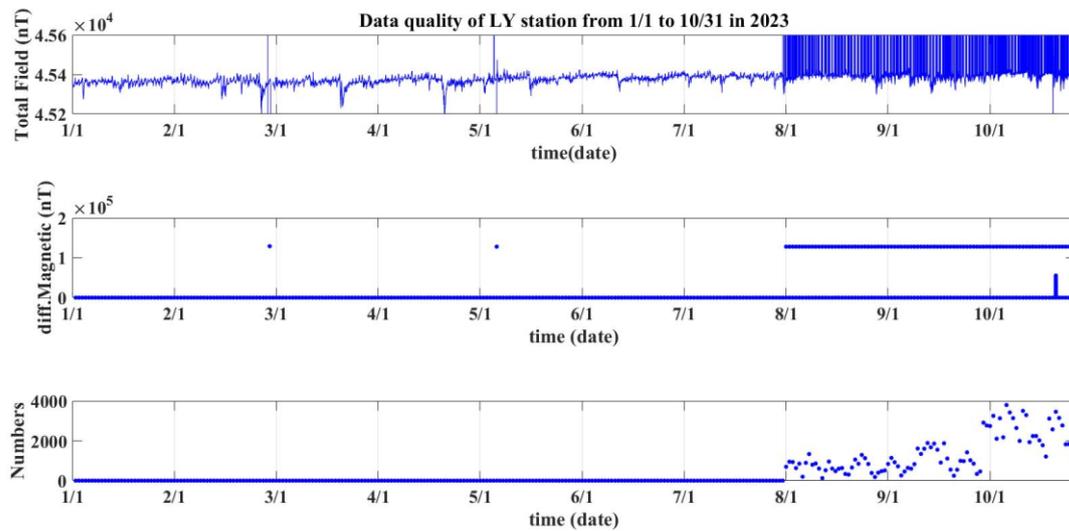
圖二、馬祖 (MT) 地磁觀測站的資料，偶有地磁場總強度突跳的情形。



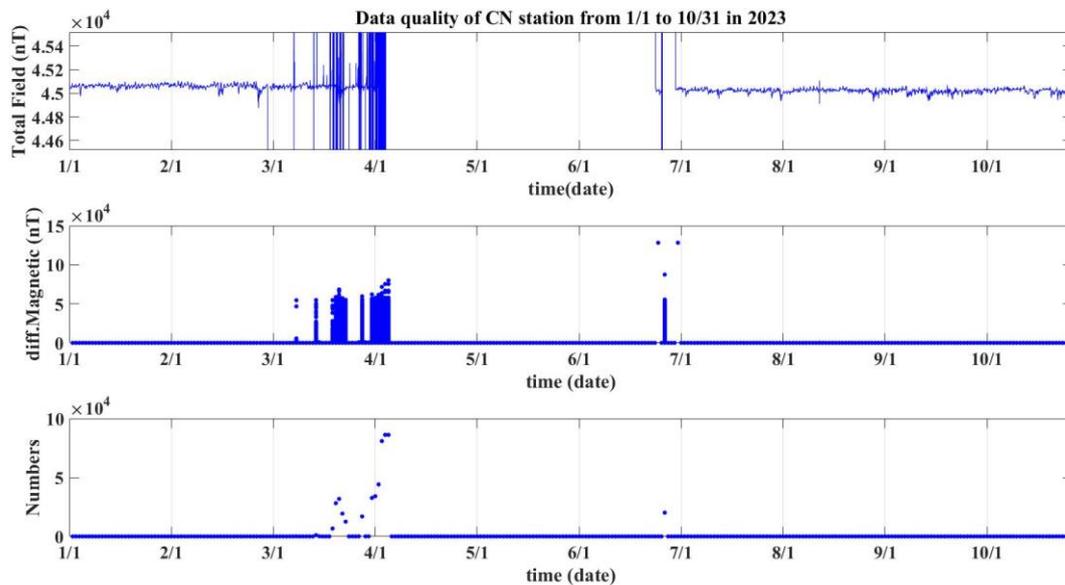
圖三、金門 (KM) 地磁觀測站的資料，地磁場總強度受到干擾的情形。



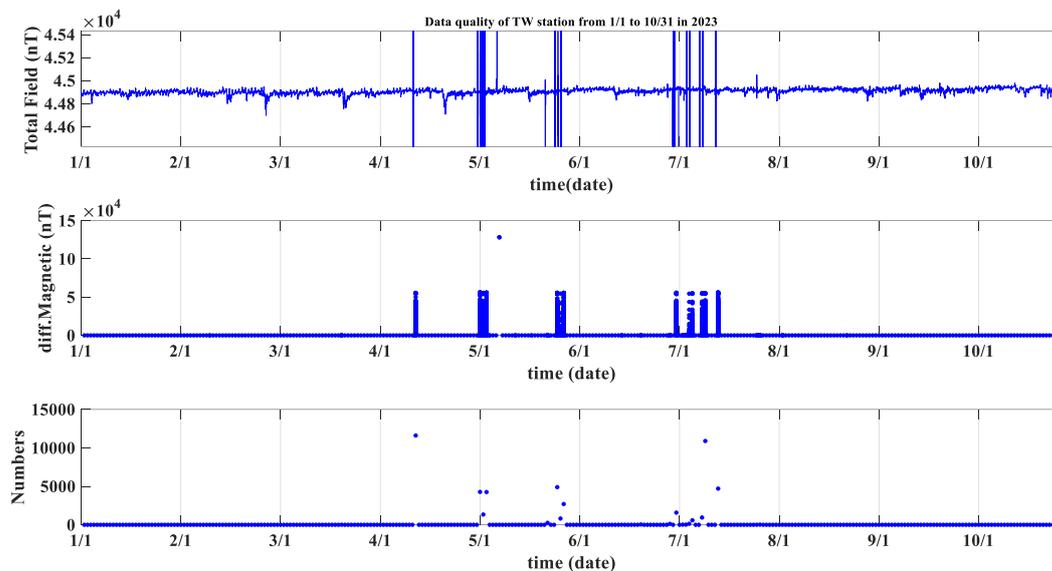
圖四、爺亨 (YH) 觀測站所記錄的全磁場強度變化，資料傳輸穩定且觀測資料品質佳。



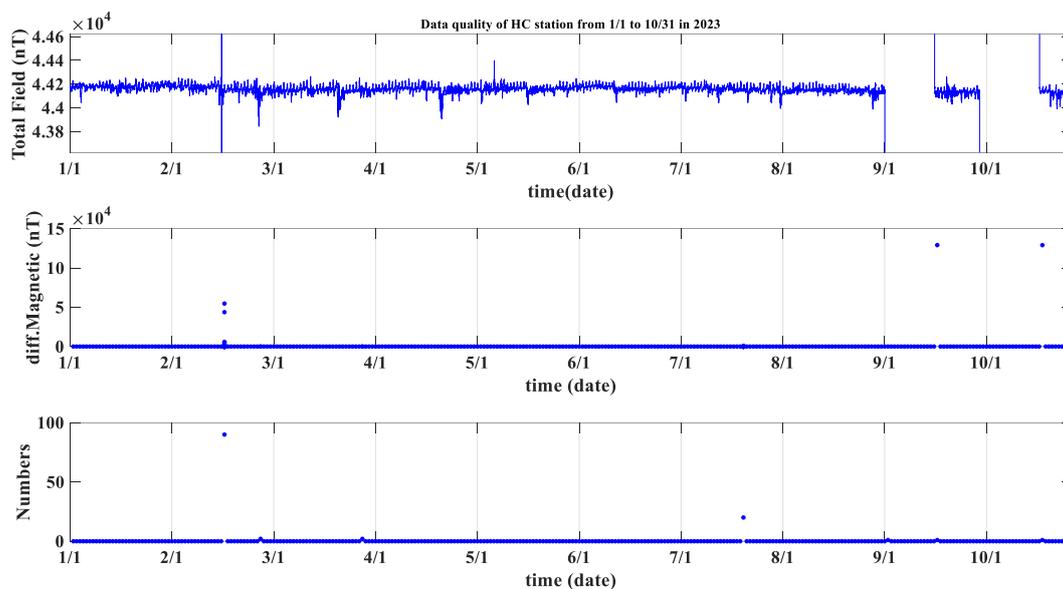
圖五、鯉魚潭 (LY) 觀測站 1 至 7 月是資料傳輸穩定且觀測資料品質佳的地磁站。不過自 8 月起，資料開始受到嚴重的擾動且持續到 10 月底仍然沒有恢復正常觀測。



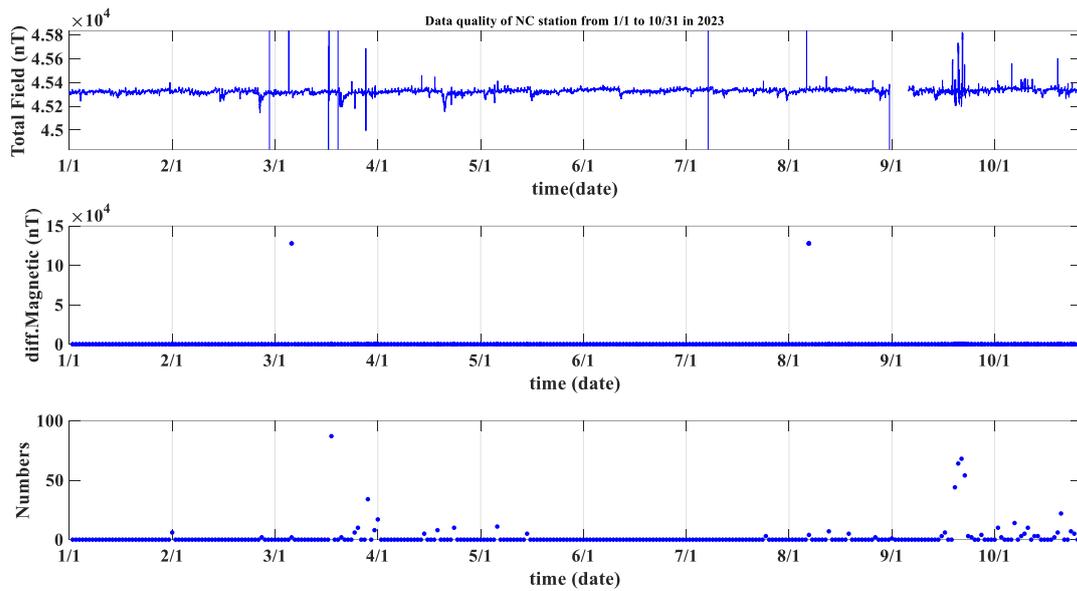
圖六、暨南國際大學的地磁觀測站 (CN)，其資料品質在 3 月下旬開始受到嚴重的擾動，4 月初因儀器故障而沒有任何的紀錄，不過在 7 月份儀器修護且恢復正常的運作，相鄰兩點的全磁場強度變化量都沒有超過 10 nT。



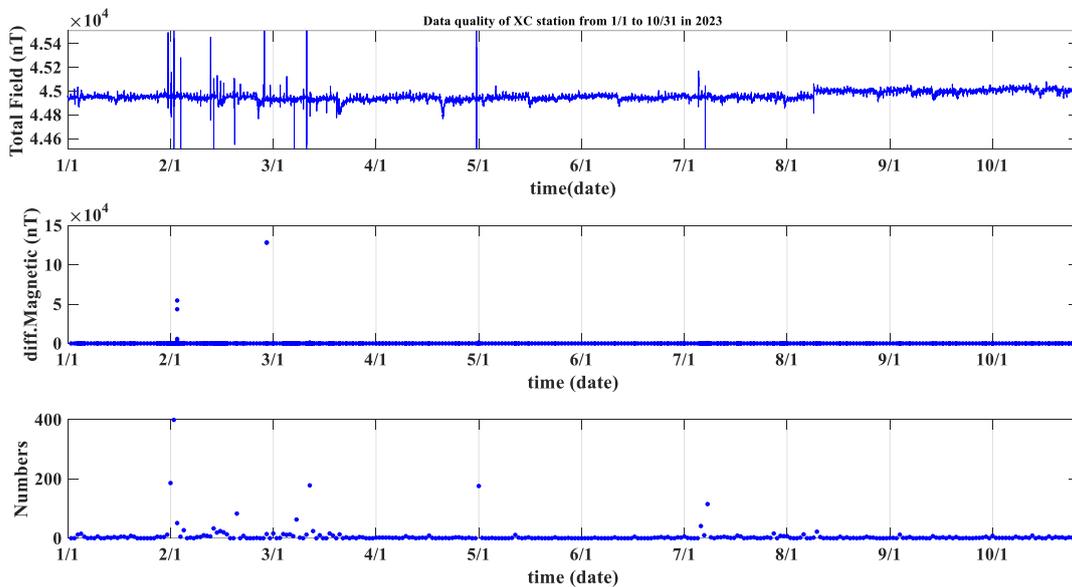
圖七、曾文 (TW) 觀測站，在4月上旬到7月上旬，共發生4次資料不明原因的擾動情況，7月中旬過後，觀測資料又恢復正常。



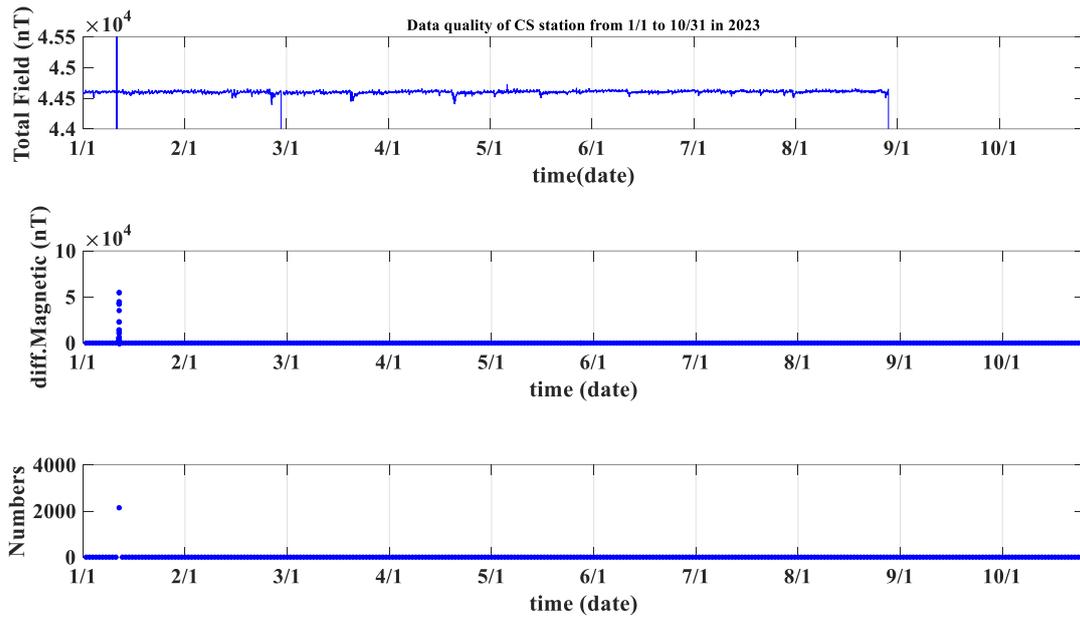
圖八、恆春 (HC) 地磁觀測站的日變化振幅較臺灣其他各觀測站大，除了9、10月兩度資料傳輸中斷外，該站整體觀測資料品質相當的不錯。



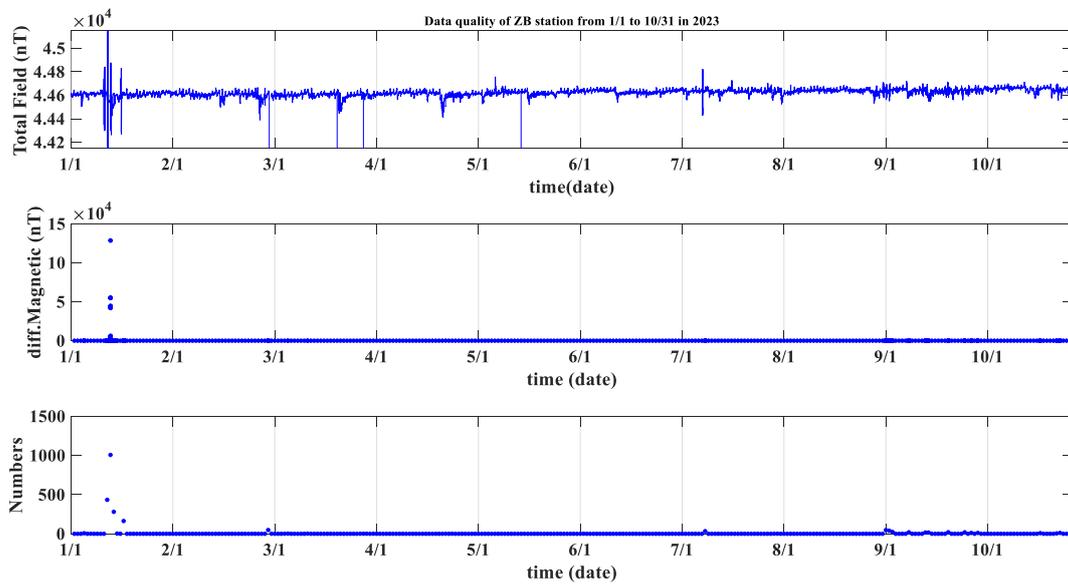
圖九、內城（NC）觀測站所記錄到的資料品質不錯，雖然有相鄰兩點的全磁場強度變化量超過 10 nT，但受干擾為短暫的、次數不多且振幅也不大，推測是受觀測站附近環境的干擾。



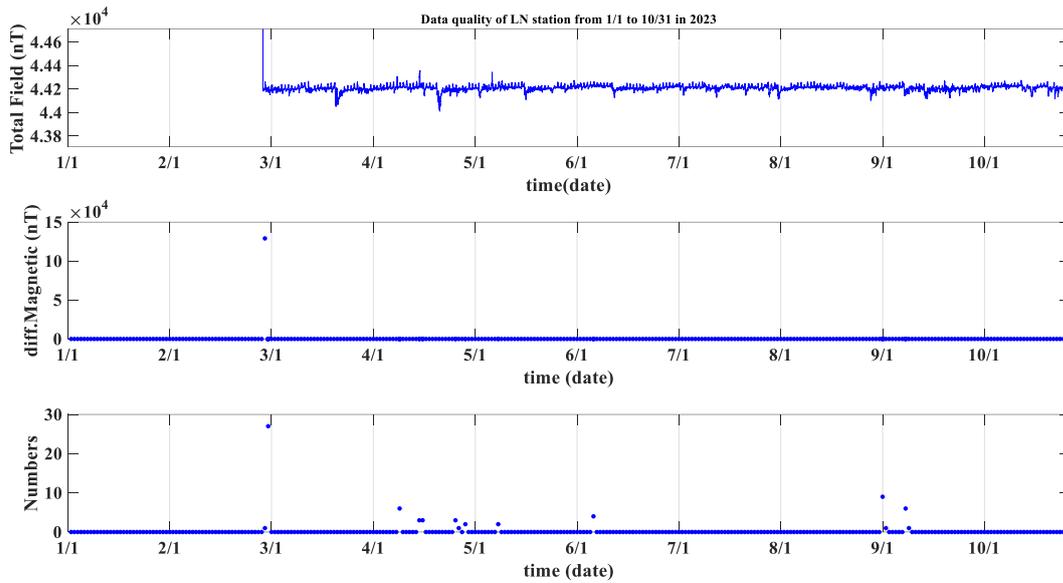
圖十、新城（XC）觀測站除了 2、3 月的觀測資料受到干擾外，該站整體觀測資料品質也是相當的不錯。



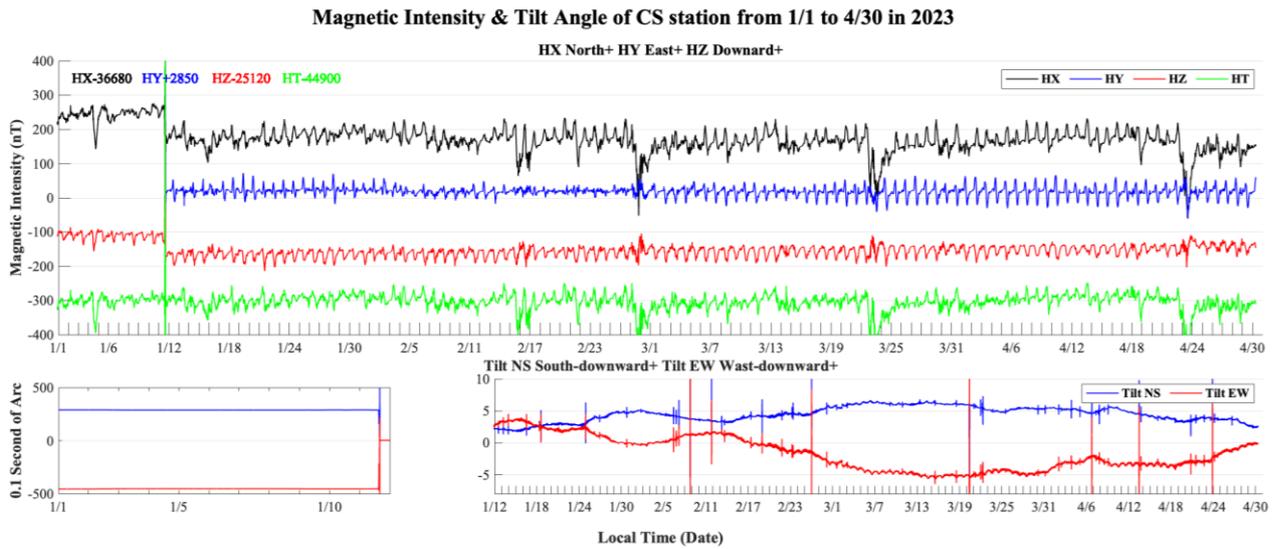
圖十一、池上（CS）地磁站記錄到高品質的觀測資料，不過在8月底因光纖網路中斷而無法回傳資料。



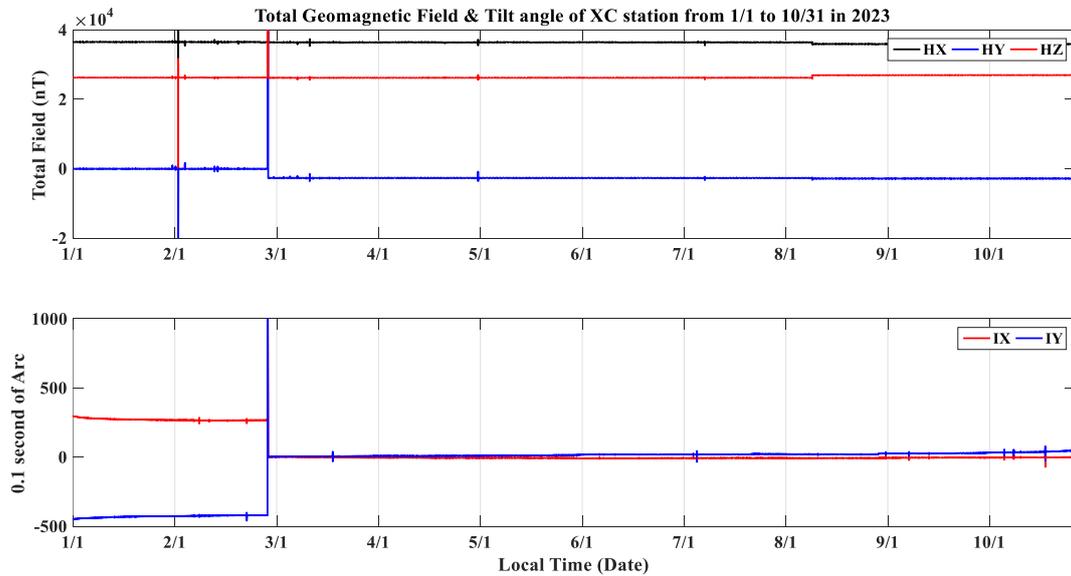
圖十二、知本（ZB）觀測站，除了1月中旬有一天的觀測資料受到不明原因的干擾外，1至10月的所記錄到的資料品質不錯。



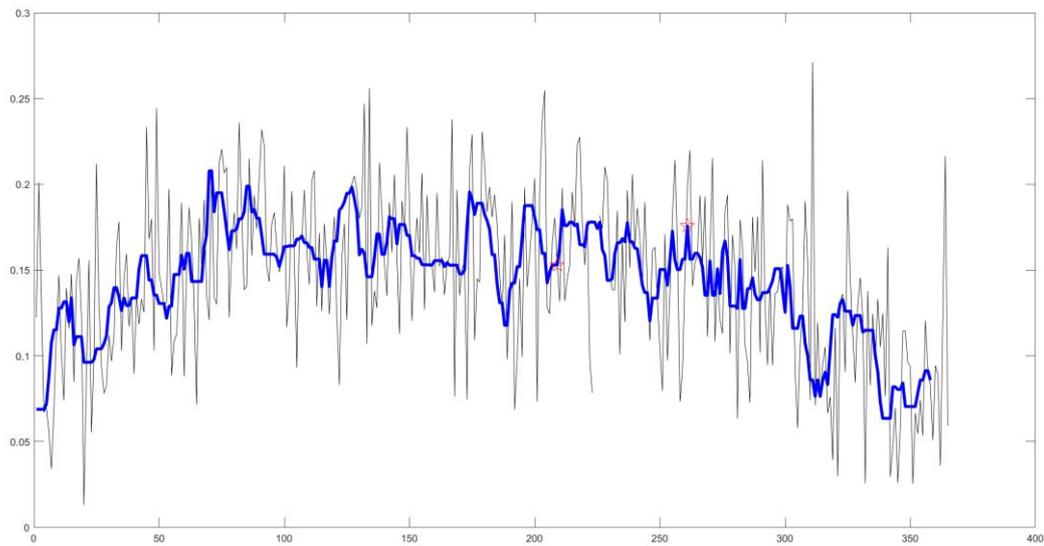
圖十三、蘭嶼 (LN) 觀測站的儀器自今年 2 月起就恢復正常的運作，前後兩點間的全磁場強度變化量超過 10 nT 少於 100 次。



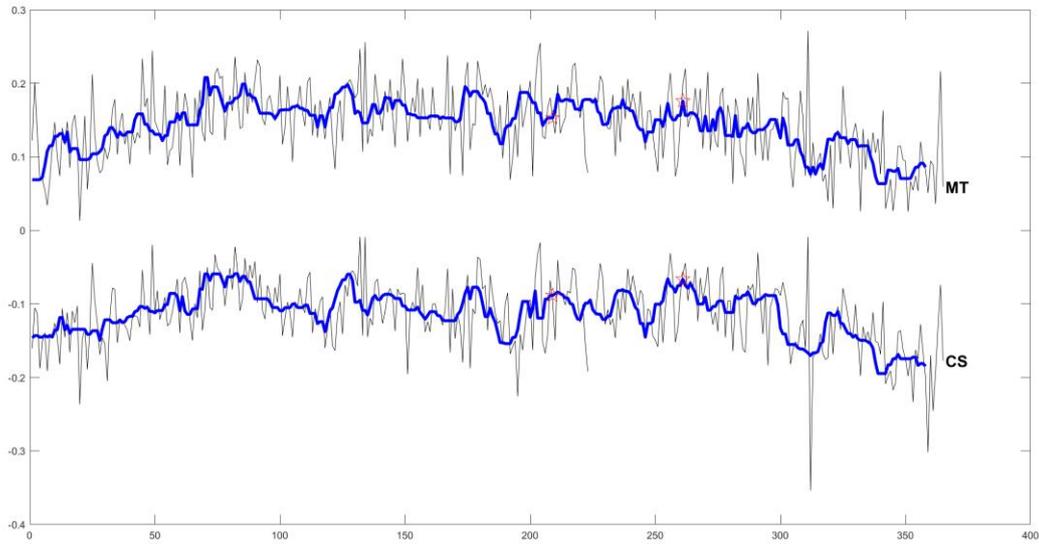
圖十四、池上觀測站於 1 月 11 日中午有突然有超過 500 角秒的傾斜紀錄，各地磁分量及總強度也都受到影響。12 日以後的地磁場總強度、各分量強度及儀器的傾斜就趨於穩定的紀錄。



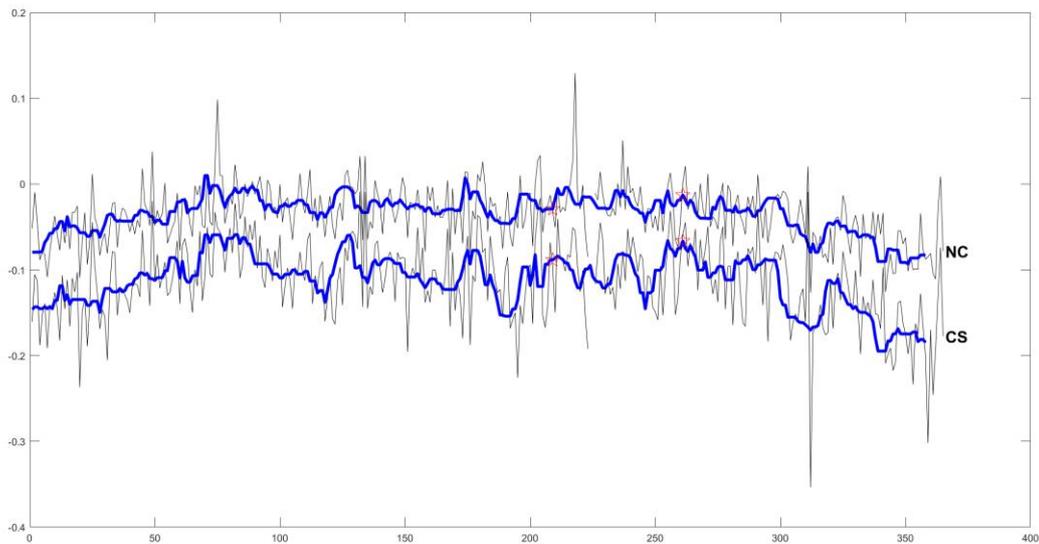
圖十五、新城（XC）觀測站於2月底，東西向突然有 1500 角秒的傾斜紀錄（下圖），各地磁分量及總強度也都受到影響（上圖）。



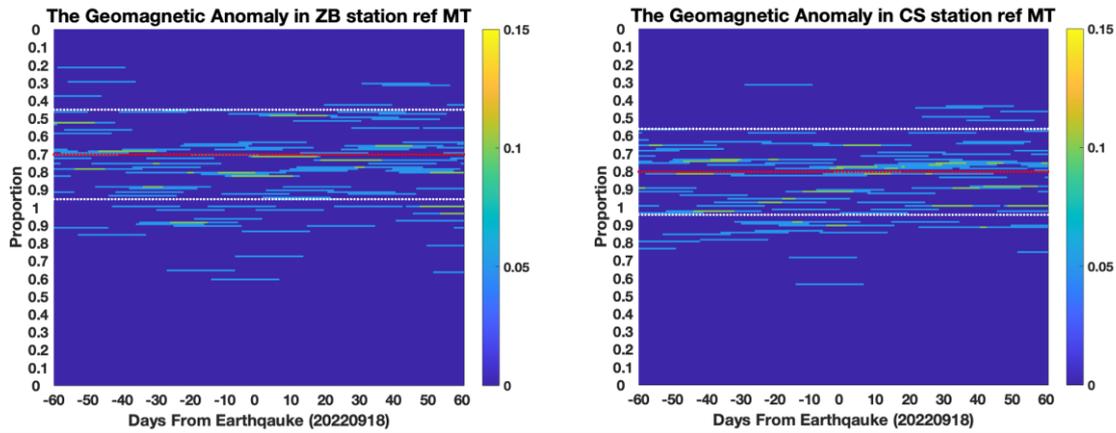
圖十六、馬祖（MT）地磁站選取 0.01Hz 之垂直與水平改變量的比值，2022 年的週均值在 0.07 至 0.2 之間變化，1 至 3 月的比值呈現上升；4 到 10 月比值在 0.15 上下變化；11 到 12 月間的比值開始變小至 0.075。（圖中黑色線為每日的比值；藍色線則為一週比值的平均值；紅色星號為 0918 臺東池上地震）。



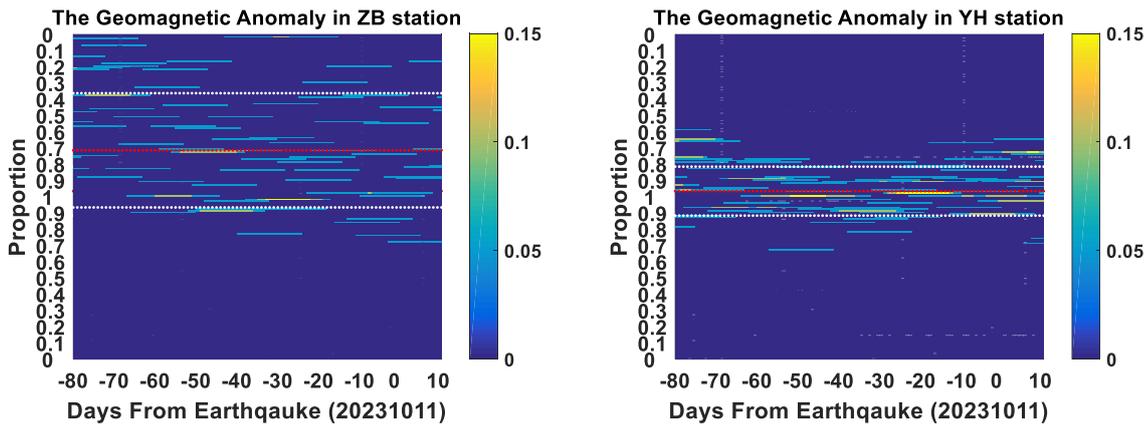
圖十七、2022年馬祖（MT）站和池上（CS）站的垂直與水平改變量比值圖。比較整年度兩個測站的改變量起伏幾乎都是相同的，唯有在0918臺東池上地震前開始有些差異。（圖中黑色線為每日的比值；藍色線則為一週比值的平均值；紅色星號為0918臺東池上地震）。



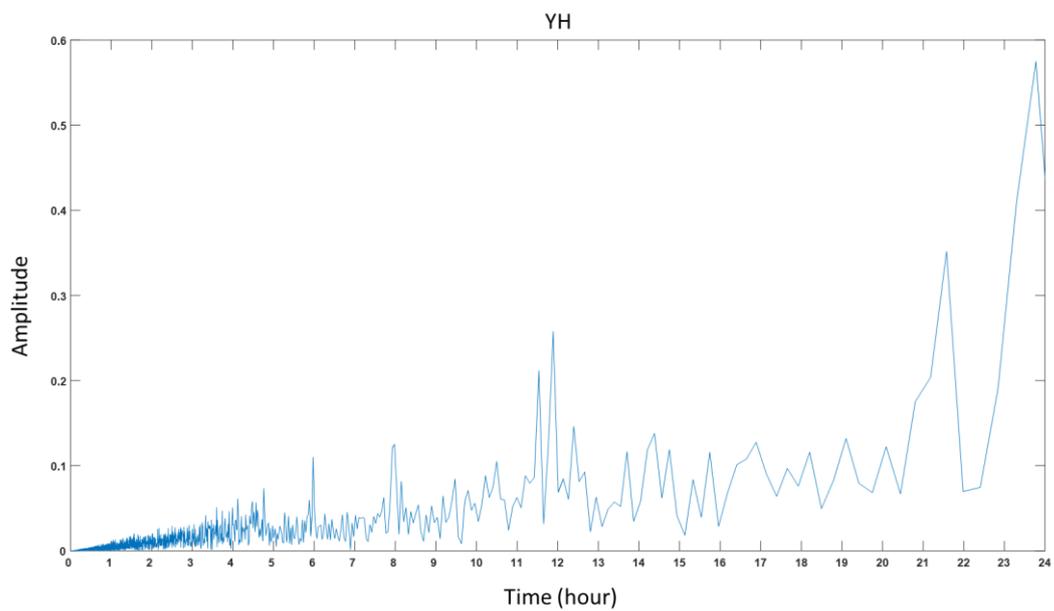
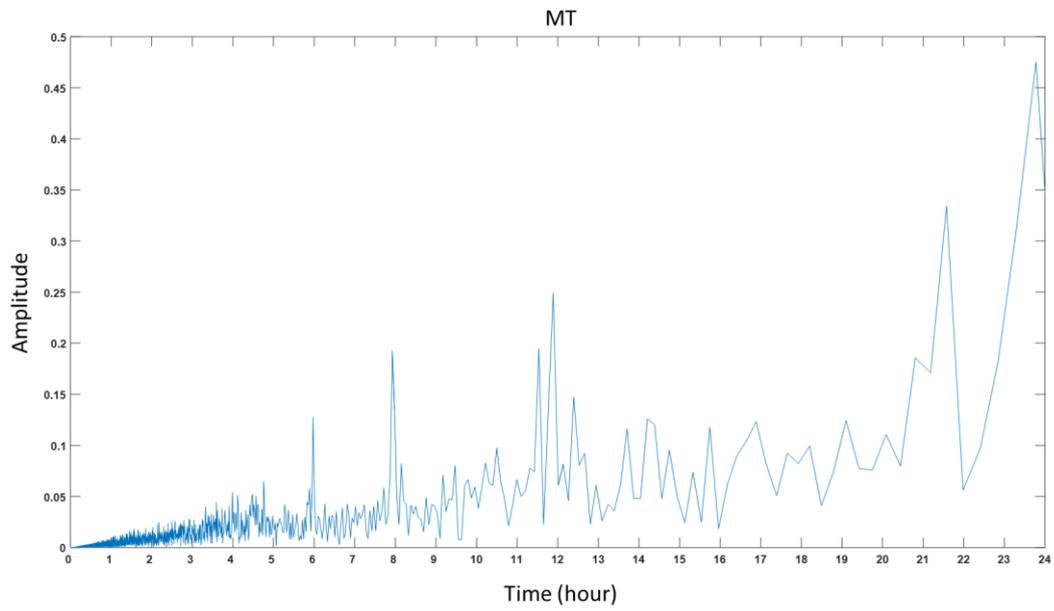
圖十八、2022年內城（NC）站和池上（CS）站的垂直與水平改變量比值圖，池上站相較內城站在9月份有較明顯的起伏，似乎可以對應到池上地震的發生。（圖中黑色線為每日的比值；藍色線則為一週比值的平均值；紅色星號為0918臺東池上地震）。



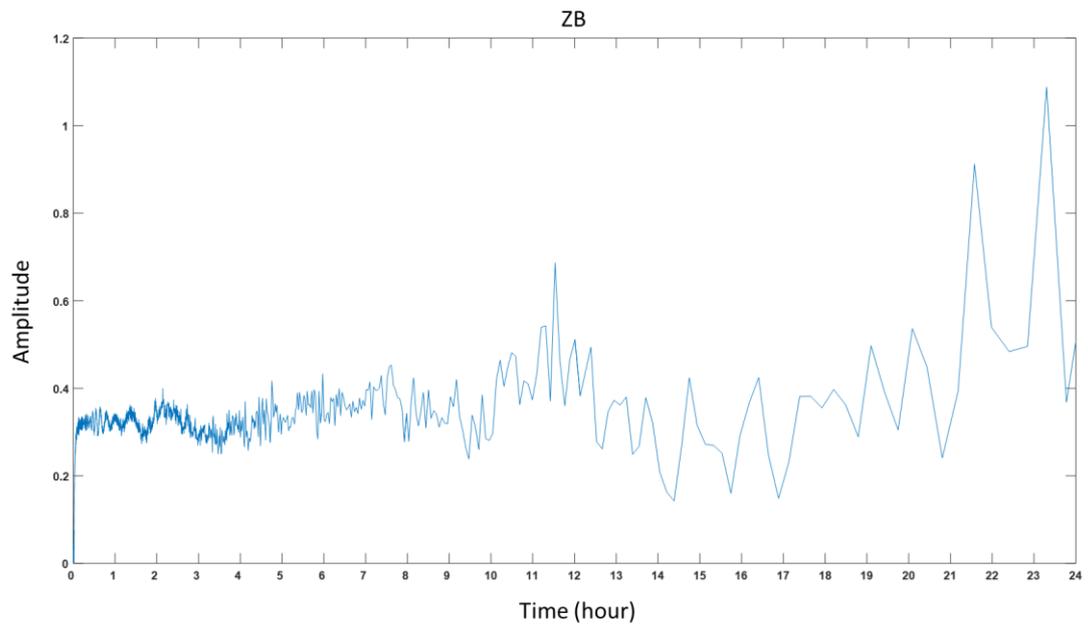
圖十九、知本（左）和池上（右）兩觀測站的中值分別為 0.7 和 0.8，一個標準偏差均為 ± 0.25 ，日變化的比值較多分布在一個標準差的下方。臺東知本站在地震前後 60 天的日變化比值並沒有改變的情形，而池上站則在地震前 20 天的日變化比值也有變小的趨勢。



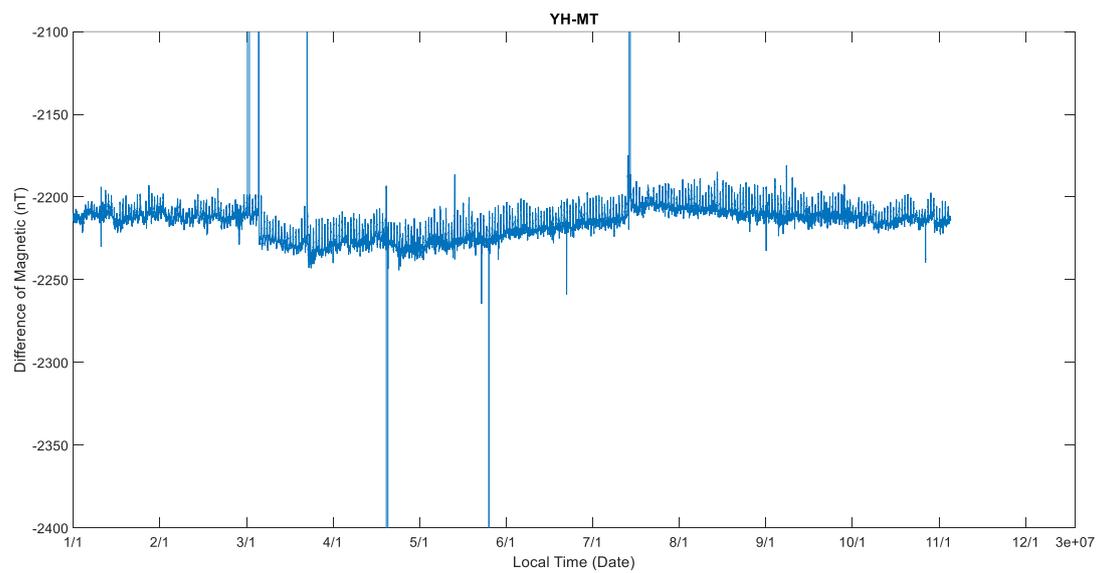
圖二十、臺東知本站（左圖）中間值為 0.7，一個標準偏差均為 ± 0.3 ，日變化的比值較多分布在一個標準差的上方。對照臺灣北部的爺亨（YH）地磁觀測站（右圖），中間值接近 1 且標準偏差在 ± 0.15 之內，在地震前 50 天之日變化的比值都沒有偏移現象。



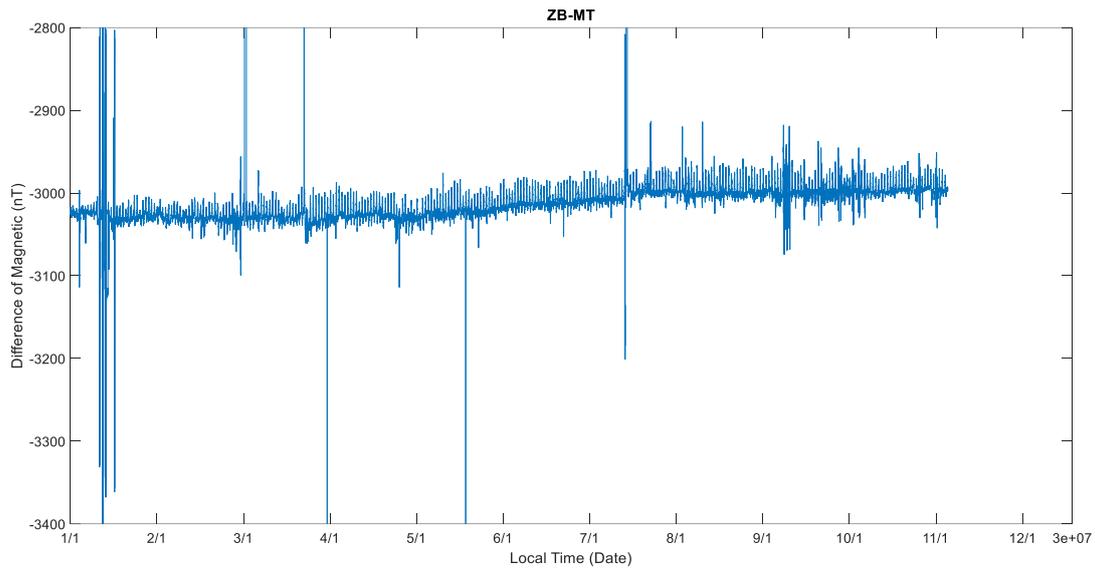
圖二十一、分別是馬祖（上圖）及爺亨（下圖）地磁站的時頻圖，兩個站都可以很清楚看到6小時、8小時、半天及全天的主要頻率。



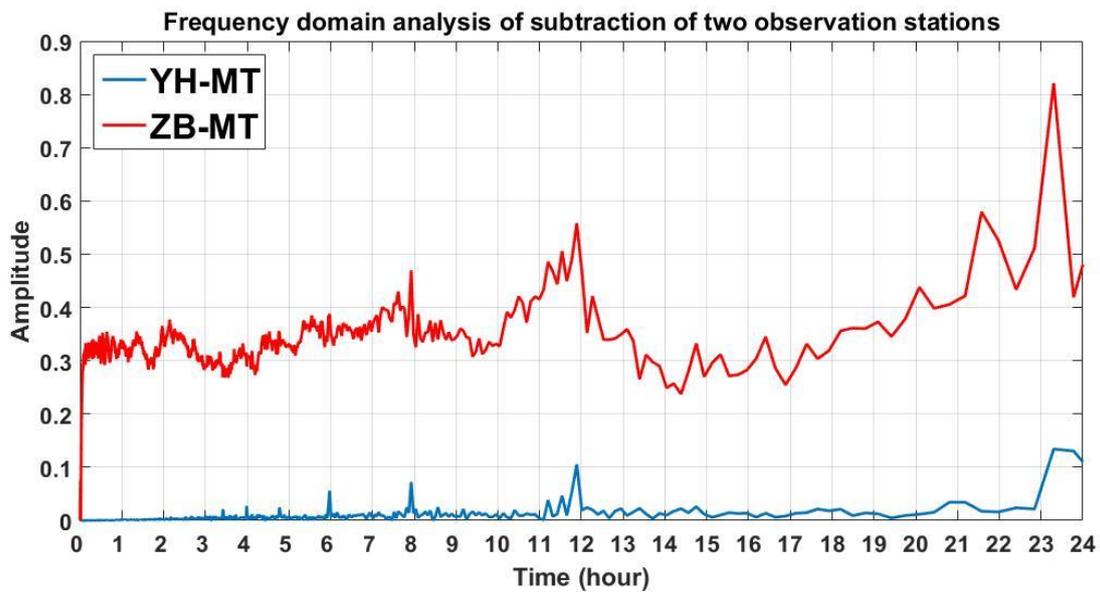
圖二十二、臺東知本（ZB）地磁站的時頻圖，6 小時及 8 小時的頻段沒有特別的明顯。



圖二十三、1 至 10 月爺亨（YH）相對馬祖（MT）地磁場強度的差值圖。



圖二十四、1 至 10 月知本 (ZB) 相對馬祖 (MT) 地磁場強度的差值圖。



圖二十五、1 至 10 月爺亨 (YH) 及知本 (ZB) 兩觀測站分別相對馬祖 (MT) 觀測站日變化之時頻圖。爺亨站相對馬祖站對照知本站相對馬祖站的日變化，兩者呈現不同的時頻分布，似乎還有其他影響地磁強度的因素。

臺灣地區 112 年地震前兆監測資料彙整及分析

子計畫二

資訊理論應用於地電磁場相關聯之地震前兆研究

陳建志 吳宗義 陳宏嘉 吳宗義

中華民國地球物理學會

摘要

基於 Zechar 等人 [2] 所提出之「機率增加之時間」(Time of Increased Probability, TIP) 概念，中央大學地球科學系陳建志教授團隊陸續探討地電及地磁資料用於地震預報的可行性，並分別發展了基於地電與地磁連續資料的地震預報演算法 GEMSTIP 與 MagTIP [1,3-5]。我們在去年的計畫 [6] 中完成了 GEMSTIP 與 MagTIP 的演算法整合，這使得同時聯合地電與地磁測站進行 TIP 預報成為可能，並允許我們把峰度、偏度以外的更多統計指標納入機率預報計算。鑒於過去資訊分析 (Informational analysis) 在探討複雜非穩態訊號及訊號背後的系統動力過程所展現的強大能力，本系列研究將探討資訊分析相關統計指標應用於 TIP 預報的潛力。由於聯合地電磁站的 TIP 演算法同時牽涉到不同性質的訊號，濾波頻段在其中的角色有進一步被探究之必要。在本期計畫中，我們探討特定濾波頻段應用在聯合地磁、聯合地電與聯合兩者的三種情境下，預報 TIP 在橫跨 8 年、總數 17 個測試區間中的表現，並完成資訊分析工具的開發。未來藉由資訊理論在地電磁場 TIP 預報之應用，我們期待以更全面的方式探討地震電磁前兆並更進一步提升整體預報表現。

關鍵字：地磁場異常、地震前兆

Abstract

Based on the concept of TIP (Time of Increased Probability) [2], much progress on earthquake forecasting using geo-electromagnetic data have been made [1,3-5]. In these studies, the forecasting algorithms GEMSTIP and MagTIP were developed separately for geoelectric and geomagnetic observation systems. In our previous project [6], we successfully integrated the algorithms of GEMSTIP and MagTIP, enabling the possibility of simultaneously utilizing geoelectric and geomagnetic stations for TIP forecasting. This integration also allows us to incorporate more statistical indicators beyond skewness and kurtosis into the probability forecasting calculations. Given the powerful capabilities demonstrated by informational analysis in studying complex non-stationary signals and the underlying dynamics of the signal processes, this series of studies aims to explore the potential of applying information analysis-related statistical indicators to TIP forecasting. Since the TIP algorithms of the joint geoelectric and geomagnetic stations involve signals with different properties, the role of filtering frequency bands needs further investigation.

In this project, we examine the application of specific filtering frequency bands in three scenarios: joint geomagnetic, joint geoelectric, and joint observations of both. The performance of TIP forecasting is evaluated over 17 testing intervals spanning 8 years. We also successfully developed the necessary tool for informational analysis, which allows the calculation of Fisher information and Shannon entropy. In the future, by applying information theory to TIP forecasting in the geo-electromagnetic field, we anticipate a more comprehensive exploration of earthquake electromagnetic precursors and further improvements in overall forecasting performance.

keyword: geomagnetic anomalies, earthquake precursor

壹、前言

(一)背景與研究概述

資訊理論始於 1948 年，Claude E. Shannon 為了探究資料壓縮之極限所提出的衡量訊息量統計指標夏農熵(Shannon entropy) [7]。夏農熵隨後被發現與波茲曼熵(Boltzmann entropy)有密不可分的關係而被應用於許多自然科學的領域，例如神經生物學 [8]、熱物理 [9]。與費雪訊息[Fisher information [10]]一同，兩者為資訊分析(Informational analysis)的核心。一般來說，費雪訊息可被視為衡量局域訊息分布特徵的度量，而夏農熵則是反映全局訊息的無序程度。在地球科學領域，費雪訊息與夏農熵可作為探討大地電磁場的複雜動態過程之工具 [11]；而進一步的研究更顯示，地電觀測紀錄的費雪訊息和夏農熵與地殼應變變化率之間存在清楚的關聯性 [12]。另一方面，基於 Zechar 等人所提出之「機率增加之時間」(Time of Increased Probability, TIP) 概念 [2]，我們已陸續探討了地電與地磁資料用於地震預報的可行性，並分別發展了基於地電與地磁連續資料的地震預報演算法 GEMSTIP 及 MagTIP [3–5,13–16]。這一系列的研究結果顯示，地電及地磁場的峰度(kurtosis)與偏度(skewness)異常與地震事件之間存在統計顯著之關聯性。

在上一期(2022 年)的研究中，我們完成了 GEMSTIP 與 MagTIP 的整合，並在一測試區間(2022 年 04 月 02 日至 09 月 27 日)對同時聯合全場地磁、三分量地磁與二分量地電場觀測資料的 TIP 預報進行測試。在此測試區間內的後驗式聯合測站預報表現分析結果顯示，在訓練期長 3、5、7、9 年中，較佳的訓練期為 3 或 9 年，其中又以 3 年最佳，大致符合陳宏嘉 (2018) GEMSTIP 的分析結果(最佳訓練期長度約在 1000 至 1200 日之間) [1]。此外，基於四個濾波頻段(ULF-A、ULF-B、BP-35、BP-40，詳表 3)的預報表現與對應的個案分析則顯示，與地震相關的訊號頻段對於地電與地磁測站而言很可能是不同的；套用單一帶通濾波頻段至所有測站將會造成預報表現方面的取捨。鑒於聯合地電場和地磁場測站的 TIP 演算法牽涉到具有不同特性的訊號，濾波頻段的作用需進一步探討。本研究旨在探討特定濾波頻段在三種情境下的應用，即聯合地磁(代號 GM)、聯合地電(代號 GE)以及同時聯合地電與地磁測站(mix)；評估範圍橫跨 8 年共 17 個測試區間。未來，透過將資訊理論應用於地電磁場 TIP 預報，我們期待能對地震電磁前兆進行更全面的探索，並進一步提升整體預報性能。

貳、資料與方法

(一)地磁場與地電場測站、資料與地震目錄

本期計畫使用了中央氣象局地電場與地磁場觀測站紀錄之時間序列。其中，磁力觀測系統共 18 測站，地磁測站安裝精度 0.1nT 的全磁場強度磁力儀或精度為 0.01nT 的三分量磁力儀，取樣率皆為每秒記錄一個觀測值(1Hz)。地電場觀測系統(GEMS)取樣率為 15Hz，量測精度為 1 微伏特 (1 μ V)。原始資料記錄著電極間的電位差，單位為伏特(V)。由於各地電站因場址的區域限制，各長偶極的方向與電極展距或有差異。在陳宏嘉的 GEMSTIP 研究 [1]中，原始資料經過前處理，使得地電場資料呈現正南北與正東西方向的紀錄，並將資料降取樣(使用平均法)為 1Hz；關於地電測站與地電資料前處理的更詳細資訊請見 [1,17]。

本研究之資料期間選定為 2011 年 01 月 01 日至 2023 年 6 月 19 日為資料期間；資料期間涵蓋全場磁力觀測、三分量磁力觀測以及二分量地電場觀測重疊的區間，以便對演算法在各種情況下之運作進行測試。地電、磁測站地理位置與名稱代號請見表 1 與圖 1。資料期間內各測站所記錄之資料的缺值一覽如圖 2，其中每日紀錄到之資料點數占一日總秒數之比例以色階標示，而完全無資料的日子呈現白色。

(二) 濾波頻段

先前的分析結果 [3-5]顯示相較於未經濾波，使用經 0.001-0.003Hz (代號: ULF_A) 或 0.001-0.01Hz (代號: ULF-B) 帶通濾波後的地磁訊號，相較於未濾波或 0.001-0.1Hz 頻段，可得到明顯更佳的預報表現。在地電場作為地震前兆的研究方面，相關研究多採用 ULF-B 濾波頻段 [18-20]。在陳宏嘉 [1]的研究中，地電訊號的濾波頻段與最終預報表現被更進一步探討，其結果顯示對於中央氣象局地電觀測站紀錄之地電訊號，高訊噪比、與地震最相關的頻帶發生在以下兩個頻段：1. $10^{-4} \leq f \leq 10^{-1.75}$ Hz (約為 0.0001 至 0.0178 Hz 之間)；2. $10^{-4} \leq f \leq 10^{-3.5}$ Hz (約為 0.0001 至 0.0032 Hz 之間)。本年度研究完成這四個代號分別為 ULF-A、ULF-B、BP-35、BP-40 的頻段分別在三種場景(僅使用地電站；僅使用地磁站；地電與地磁皆使用)下的應用測試；測試頻段一覽表請見表 3 與圖 3。

(三) MagTIP 演算法

本研究將陳宏嘉等人建立的 GEMSTIP [1]與多變量 MagTIP 演算法 [3]進行整合，以期未來能同時利用地磁場與地電場觀測系統進行地震預報。GEMSTIP 與 MagTIP 演算法的核心概念為「機率增加的時間」(TIP, Time of Increased Probability)。在本研究中，目標事件即為符合條件之地震事件(下稱"EQK")，而地震機率增加的時間(下稱"TIP=1")即為特定地電、磁場統計指標經由根據歷史資料最佳化後的參數模型所指示之異常時間區段。若電磁前兆與地震事件的發生具關聯性，則 TIP 與 EQK 的擬合程度應具統計上的關聯性。

現行 GEMSTIP 與 MagTIP 使用的統計指標為反映觀測值分布不均程度之偏度 S (skewness)與反映觀測值分布集中程度之峰度 K (kurtosis)。其中，峰度與偏度的定義如式(1)、(2)所示；其數學上的特性以及用於研究地震前兆的優勢已於先前研究 [1,4]中說明與展示。

$$S(x) = \text{skewness}(x) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

$$K(x) = \text{kurtosis}(x) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2\right)^2} \quad (2)$$

GEMSTIP 與 MagTIP 使用擬合程度(fitting degree)評估電磁前兆(TIP=1)與地震事件(EQK=1)的關聯性，概念來自天氣預報之準確度評估方法 [21,22]。擬合程度 d 介於 -1 至 1 之間，以預警網格的比例 $[\tau(\mathbf{g})$; ratio of alarmed area] 與遺漏預報地震的比例 $[\nu(\mathbf{g})$, missed rate] 所定義，如式(3)、(4)與(5)所示。

$$\tau(\mathbf{g}) = \frac{\sum_t (TIP(t|\mathbf{g}) \equiv 1)}{\sum_t (TIP(t|\mathbf{g}) \geq 0)} \quad (3)$$

$$\nu(\mathbf{g}) = \frac{\sum_t (TIP(t|\mathbf{g}) \equiv 0 \wedge EQK(t|\mathbf{g}) \equiv 1)}{\sum_t (TIP(t|\mathbf{g}) \geq 0 \wedge EQK(t|\mathbf{g}) \equiv 1)} \quad (4)$$

$$d(\mathbf{g}) = 1 - \tau(\mathbf{g}) - \nu(\mathbf{g}) \quad (5)$$

由於 τ 與 ν 存在抵換關係(trade-off)，以擬合程度 d 為標準的參數模型最佳化即為一追求高命中率的同時也盡可能限縮預報的時空範圍(更精確的預報)之過程。其中，以 τ 為橫軸、 ν 為縱軸之平面，稱為莫昌爾誤差圖(Molchan diagram) [2]；莫昌爾圖中的對角線($\nu = 1, \tau = 0$ 至 $\nu = 0, \tau = 1$ 之連線) 為隨機猜測之參考線。關於本節所提及之參數的更多探討，請參照 2019 年的計畫 [4]。關於聯合測站法的詳細資訊，請參照 [1,4]。使用的參數範圍見表 2。

為了評估擬合程度的統計顯著性，先前研究 [1,2] 以「地震依據二項式隨機分布出現在預測模型定義之預警區(alarmed area)的內或外」作為虛無假設，於莫昌爾誤差圖上定義信賴邊界(Confidence Bounds)。考量地震預報問題的困難度，本研究以 68% 的機率(相當於一個標準差)拒絕前述虛無假設之參考線作為擬合程度 d 的信賴邊界。若計算得到的 d 值在邊界之上，則代表實際地震的發生與基於地或電磁日統計量之 TIP 預測之間的關聯性屬隨機產生的結果之可能性低於 32%。

參、結果與討論

(一) EQK 遺漏率、TIP 預警率以及擬合程度的統計分析

在前一年度的報告中，我們同時聯合所有可用的地電與地磁測站進行 TIP 計算，在 3、5、7、9 年四種長度的訓練期，探討較佳模型(各測站前十名)之預報 TIP 在單一預報期(測試區間 2022 年 04 月 02 日至 2022 年 09 月 27 日)的預報表現。在該測試區間的結果顯示，3 年訓練期的 EQK-TIP 擬合程度通常較高。然而，在更進一步的個案地震之分析與探討中，我們發現測站與目標地震在空間上的位置分布(例如：目標地震鄰近有效測站之數量與距離)可能是左右單一測試區間的 EQK-TIP 擬合程度高低之重要因子。

為了降低測站與目標地震在空間分布上的差異性對分析結論可能造成的影響與偏誤，本研究對總數 17 個測試區間(即"預報期")內的結果進行統計分析。其中，資料集分為 17 組互有重疊的驗證資料。在第 1 至 16 個測試區間，每一個驗證資料集皆包含一個 3 年長的訓練期與 179 至 180 日長的預報期。第 17 個測試區間由於資料取得與結果計算的時間差，僅有 79 日長，如圖 4 所示。

基於四組濾波頻段(詳表 3)，我們分別在以下三種場景分別進行訓練與測試：

1. 僅使用地電測站 (代號：GE)
2. 僅使用地磁測站 (代號：GM)
3. 同時使用地電與地磁測站 (代號：mix)

在一場景下，每一個驗證資料集皆包含 500 組聯合測站模型($NP_{mod} = 500$)的結果。我們將驗證結果依三種場景與四種濾波頻段分別呈現。綜合所有測試區間之聯合測站模型的 TIP 預警率及對目標地震 EQK 的遺漏率以莫昌爾誤差圖展示於圖 5(散佈圖)及圖 6(等高線圖)。其中，TIP 預警率的分佈與目標地震遺漏率的分佈，以雲雨圖(rain clouds)的方式呈現於圖 7。

我們發現不同場景下的模型在標記 TIP=1 時採取不同的策略，如圖 6 及圖 7 所示。相較於 GE 與 mix 場景，GM 場景下的模型無論使用何種濾波頻段，其 TIP 預警率通常較低且有著最低的預警率中位數。在 EQK 遺漏率的部分，GM 場景下則有較高的遺漏率中位數。這樣的結果表示，根據地磁測站資料訓練的模型在標記 TIP=1 上採取較為保守的策略。這同時暗示著在基於地磁測站的 TIP 預報上，擴大預報範圍代價較高。相較之下，GE 或 mix 場景在標記 TIP=1 時採取較為平衡的策略，即在較高的預警率上命中更多地震。

各濾波頻段、在 17 組測試區間內各 500 組模型之擬合程度分佈以直方圖呈現於圖 8。各測試區間內模型的擬合程度平均值以長條圖的形式、依場景與不同濾波頻段呈現於圖 9。根據涵蓋所有測試區間之時空範圍內的總預警率(總預警面積/總可預警面積)及總目標地震遺漏率(總目標地震遺漏數/總目標地震數)，在各場景與濾波頻段下計算得到之擬合程度則呈現於圖 10。圖 9 及圖 10 及中的 68%信賴邊界(Confidence Boundary)係 Zechar 等人所提出之評估 TIP 預報表現的參考線 [2]，其意義近似於信賴水平(Confidence Level)。

如圖 9 所示，不同測試區間之間的 TIP-EQK 擬合程度及 68%信賴邊界差異明顯。不同測試區間中的信賴邊界變異很大，基本上反映了各測試區間內的目標地震數量差異很大的事實，如表 4 所示。然而，根據只考慮總預警率與總目標地震遺漏率的結果，如圖 10 所示，GE 場景下 BP-35、ULF-A 頻段對應之擬合程度明顯超過 68%信賴邊界；在 GM 場景下，BP-35、BP-40、ULF-B 頻段對應之擬合程度明顯超過 68%信賴邊界；在 mix 場景下，不同濾波頻段下的擬合程度皆明顯超過 68%信賴邊界。結果顯示，對於地磁站而言，依據 BP-40、ULF-B 頻段訊號訓練與預報的模型表現相對較佳；對於地電站而言，依據 BP-35、ULF-A 頻段訊號訓練與預報的模型表現相對較佳；對於聯合地電與地磁站的場景而言，四種頻段表現相當。

(二) 個案分析：2022-2023 年各場景下對目標地震的機率預報

圖 11 至圖 27 展示在 GE、GM、mix 場景下，不同濾波頻段的模型對 2022 年至 2023 年間發生的目標地震之機率預報時序圖(對應到 2021 年 10 月至 2023 年 6 月的測試區間)。事件代號與細節描述如表 5。

H1 至 H5 以及 T2a，為期間內花蓮地區發生的地震，如圖 11 至圖 17 所示。對於 H1 事件，由於鄰近事件的玉里地磁站(YL)無資料，故僅地電站能提供可用的模型；以下僅就 GE 場景下的結果進行描述。H1 的結果如圖 11 所示，根據 ULF-B 濾波資料訓練並進行預測的模型，在地震發生的當下有明顯較高的預報機率(>40%)。值得一提的是，BP-35 模型的預報機率雖然在事件發生當下較 ULF-B 的預報機率低，但在事件發生前 30 天內，預報機率數度高於 70%。對於 H2 事件，GM

場景下僅 BP-40 有可用之模型，故以下僅就 GE 場景下的結果進行描述。H2 的結果如圖 12 所示，在事件發生當下，BP-35 的模型預報機率最高(75 – 100%)，且預報機率在事件發生後隨時間降低。BP-40 模型的預報機率在事件發生當下也大於 60%，且預報機率在事件發生後隨時間降低。對於 T2a 的兩個事件，由於鄰近事件的玉里地磁站(YL)無資料，故僅地電站能提供可用的模型；以下僅就 GE 場景下的結果進行描述。事件發生當下，所有頻段的模型預報機率皆低於 30%。值得注意的是，BP-35 的預報機率在事件發生前幾日一度超過 50%。BP-40 及 ULF-A 的預報機率則是大約三個月前達到較高值，並在這之後下降。對於 H3 事件，鄰近有資料的測站為南澳地電站(ENAN)、新城地電站(SHCH)以及新城地磁站(XC)。H3 的結果如圖 15 所示。GE 場景下各濾波段的預報機率在事件發生當下都呈現較高值，其中 BP-35 的預報機率最高。事件發生當下，GM 場景下各頻段模型預報機率皆不顯著，但值得一提的是，在事件發生的前兩個月內，GM 下的 BP-40 預報機率一度突破 60%、BP-35 的預報機率也一度超過 40%。最後，mix 場景顯然由地電站主導，其預報機率在時間上的動態特徵非常接近 GE 場景的結果；這可能是因為 SHCH 與 ENAN 距離目標地震較 XC 站近，故反應較明顯所致。對於 H4 及 H5 事件，由於鄰近的 YL 地磁站無資料，故僅地電站能提供可用的模型；以下僅就 GE 場景下的結果進行描述。H4、H5 的結果如圖 16 及圖 17 所示。對於 H4 事件，BP-35 及 BP-40 的預報機率皆突破 50%。對於 H5 事件，則是 BP-35 及 ULF-B 的預報機率較高 (> 30%)。值得一提的是，H5 發生前一個月內，BP-35 及 ULF-B 的預報機率一度超過四成。

T1 至 T5 為期間內臺東地區發生的地震，如圖 18 至圖 24 所示。對於 T1 事件，鄰近測站僅有蘭嶼地磁站(LN)。結果顯示，GM/mix 場景下，BP-40 的模型在事件發生當下有明顯較高的預報機率(> 50%)。對於 T2 事件，BP-35 的預報機率之時間特徵，最能與地震事件發生的時間匹配。在 GE 與 GM 場景下，BP-35 的預報機率在半個月內上升到 30-40%。我們也發現 GM 場景下，BP-40 在 2022 年 4 月至 2023 年 1 月之間，數度上升至 60%。對於 T3 事件，僅地電站能提供可用的模型。GE 場景下各頻段的預報機率大多在 40%以下，且無明顯時間上的特徵。T4 與 T2 事件都發生在非常靠近池上地磁站(CS)的位置。T4 事件在 GM 場景下、2022 年 4 月至 2023 年 6 月間，BP-40 的預報機率呈現不穩定的狀態，且數度突破 60%；另一方面，在 GM 場景下，BP-35 的預報機率則是呈現震前不穩定(數度接近或突破 4 成)、震後穩定(趨近於零)的模式。

O1 至 O3 為期間內其他地區發生的目標地震，如圖 25 至圖 27 所示。對於 O1 事件，GM 場景下僅 ULF-B 有可用之模型，故以下僅就 GE 場景下的結果進行描述。結果顯示，ULF-B 及 BP-35 對該事件有明確的反應，在事件發生當下預報機率分別約為 70%與 90%，且在事件發生後很快地下降。對於 O2 事件，鄰近測站只有楓港地電站(FENG)，故以下僅就 GE 場景下的結果進行描述。各頻段的預報機率顯示，除了 BP-35 的預報機率在事件發生 30 天內一度上升至接近 40%，其餘時段及頻段的預報機率大多低於 20%。對於 O3 事件，鄰近的日月潭地磁站(SM)、雙龍地磁站(SL)皆無觀測資料，且暨南地磁站(CN)觀測時間過短，無訓練資料可用；以下僅就 GE 場景下的結果進行描述。我們可以發現 BP-40 頻段的對應模型在地震發生前半年期間內，預報機率數度上升至 60%；BP-35 頻段的對應模型在地震發生前半年期間內，預報機率數度上升至 80%；ULF-B 頻段的對應模型則是在地震發生時間的附近達到區域峰值(~ 50%)。

(四) 費雪訊息及夏農熵

費雪訊息(FIM)及夏農熵(SE)為時間序列動態特徵之量度指標。其中，費雪訊息為對時間序列的組織或秩序水平(orderness)的量化指標，而夏農熵為不確定性或混亂程度(randomness)的量化指標。兩者之數學定義如下：

$$FIM = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial}{\partial x} f(x) \right)^2 \frac{dx}{f(x)} \quad (6)$$

$$SE = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \log f(x) dx \quad (7)$$

其中，夏農熵常被轉換為只允許正值的指數型式(Shannon Entropy Power, SEP)，常用於等效表達系統動態特徵之不確定性，如下：

$$SEP = \frac{1}{2\pi e} e^{2H_X} \quad (8)$$

本研究基於 MATLAB 進行費雪訊息及夏農熵計算程式 [23]之開發。圖 28 展示 2021 年 1 月 1 日至 5 日，將軍(CHCH)地電站訊號的費雪訊息及夏農熵計算範例。

肆、結論

在本期計畫中，我們對 ULF-A、ULF-B、BP-35、BP-40 濾波頻段在廣泛的測試區間中進行較以往更為全面的分析，並發展資訊分析工具。研究結果顯示，藉由地電與地磁測站的互補(mix 場景)，TIP 預報能夠涵蓋更廣泛地理範圍內可能發生的地震事件，且有助於進一步降低目標地震遺漏率。相較於單純聯合地電(GE)或地磁(GM)測站，聯合地電與地磁測站(mix)的模型採取較為平衡的策略，以稍高的預警率進一步降低地震遺漏率。在基於機率預報實際應用方面，mix 場景在多數案例中，能夠提供更值得參考的資訊。

在四種濾波頻段、三種場景下的交互驗證結果顯示，在 GE 場景下，BP-35 與 ULF-A 組別的擬合程度顯著高於 68%信賴邊界；GM 場景下，BP-35、BP-40 與 ULF-B 組別的擬合程度顯著高於 68%信賴邊界；在 mix 場景下，各場景之擬合程度相當，皆顯著大於 68%信賴邊界。這樣的結果顯示，四種頻段皆為涵蓋與地震相關的電磁資訊之重要頻段，其中 BP-40 頻段在聯合地電與地磁測站的 TIP 預報中表現較佳。然而，BP-40 與其他三種濾波頻段擬合程度之差異並非決定性；由於這四個頻段互有重疊，我們推測本研究中地電站與地磁站模型在不同頻段訊號之預報表現差異可能由與地震不相關的地電磁雜訊頻段不同所導致。需要注意的是，基於擬合程度的交互驗證結果僅能反映預報機率與地震事件在時間上的特徵之一致程度，並無法反映與衡量震前的機率上升與地震之間的關聯性。在 2021 年 10 月至 2023 年 6 月期間、橫跨數個縣市的 12 個地震或地震叢集的個案分析中，我們發現預報機率較高值常出現在事件發生前數日至三個月；這些震前機率增加的時間具有預報方面的參考價值，但不會反映在擬合程度數值的提升上。

最後，我們完成了費雪訊息及夏農熵的計算程式之開發。未來，我們期待地電磁的費雪訊息及夏農熵，能夠更進一步地增進 TIP 預報之表現。

參考文獻

- [1] Chen H.-J., 地電訊號異常與地震的關聯性研究, 國立中央大學, 2018.
- [2] J. D. Zechar and T. H. Jordan, *Testing Alarm-Based Earthquake Predictions*, *Geophysical Journal International* **172**, 715 (2008).
- [3] 陳建志, 吳宗義, and 陳宏嘉, 多變量 MagTIP 預報系統之研究 (計畫編號: MOTC-CWB-110-E-01), (2021).
- [4] 陳建志 and 吳宗義, 地磁場異常與地震的關連性研究 (計畫編號: MOTC-CWB-108-E-01), (2019).
- [5] 陳建志 and 吳宗義, 以 MagTIP 預報模型評估地磁場異常與地震的關連性 (計畫編號: MOTC-CWB-109-E-01), (2020).
- [6] 陳建志, 吳宗義, and 陳宏嘉, 臺灣地區 111 年地震前兆監測資料彙整及分析—資訊理論應用於地電磁場相關聯之地震前兆研究 (計畫編號: MOTC-CWB-111-E-01), (2022).
- [7] C. E. Shannon, *A Mathematical Theory of Communication*, *The Bell System Technical Journal* **27**, 379 (1948).
- [8] A. Zador, *Spikes: Exploring the Neural Code*, *Science* **277**, 772 (1997).
- [9] E. T. Jaynes, *Information Theory and Statistical Mechanics*, *Phys. Rev.* **106**, 620 (1957).
- [10] R. A. Fisher and E. J. Russell, *On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* **222**, 309 (1922).
- [11] L. Telesca, M. Lovallo, H.-L. Hsu, and C.-C. Chen, *Analysis of Dynamics in Magnetotelluric Data by Using the Fisher–Shannon Method*, *Physica A: Stat. Mech. Its Appl.* **390**, 1350 (2011).
- [12] L. Telesca, M. Lovallo, G. Romano, K. I. Konstantinou, H.-L. Hsu, and C. Chen, *Using the Informational Fisher–Shannon Method to Investigate the Influence of Long-Term Deformation Processes on Geoelectrical Signals: An Example from the Taiwan Orogeny*, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* **414**, 340 (2014).
- [13] 陳建志, 陳宏嘉, and 徐漢倫, 地震電磁前兆現象之研究 (計畫編號: MOTC-CWB-103-E-02), (2014).
- [14] 陳建志, 陳宏嘉, and 徐漢倫, 地震電磁前兆現象之研究: TIP 預警模型之建立與顯著性測試 (計畫編號: MOTC-CWB-104-E-02), (2015).
- [15] 陳建志, 陳宏嘉, and 孫郁勝, 地震電磁前兆現象之研究: 地震電磁前兆現象之研究 (計畫編號: MOTC-CWB-105-E-01), (2016).
- [16] 陳建志, 陳宏嘉, and 孫郁勝, 地震電磁前兆現象之研究: 地電場的天然時間分析法與其地震前兆的初步研究 (計畫編號: MOTC-CWB-106-E-01), (2017).
- [17] Hsu H.-L., 臺灣天然電磁場觀測研究, 國立中央大學, 2013.
- [18] S. Uyeda, M. Hayakawa, T. Nagao, O. Molchanov, K. Hattori, Y. Orihara, K. Gotoh, Y. Akinaga, and H. Tanaka, *Electric and Magnetic Phenomena Observed before the Volcano-Seismic Activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **99**, 7352 (2002).

- [19] K. Hattori, P. Han, C. Yoshino, F. Febriani, H. Yamaguchi, and C.-H. Chen, *Investigation of ULF Seismo-Magnetic Phenomena in Kanto, Japan During 2000–2010: Case Studies and Statistical Studies*, *Surv Geophys* **34**, 293 (2013).
- [20] P. Han, K. Hattori, J. Zhuang, C.-H. Chen, J.-Y. Liu, and S. Yoshida, *Evaluation of ULF Seismo-Magnetic Phenomena in Kakioka, Japan by Using Molchan's Error Diagram*, *Geophys. J. Int.* **208**, 482 (2017).
- [21] A. H. Murphy, *What Is a Good Forecast? An Essay on the Nature of Goodness in Weather Forecasting*, *Wea. Forecasting* **8**, 281 (1993).
- [22] Y. Y. Kagan, *Are Earthquakes Predictable?*, *Geophysical Journal International* **131**, 505 (1997).
- [23] W. Tsung-Hsi, *Fisher Information and Shannon Entropy*, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/154642-fisher-information-and-shannon-entropy>.

圖表

表 1 地電、地磁測站站名、代號、位置一覽表。本期報告暫未使用的測站以淺灰色標示。

測站代號	測站名稱	緯度	經度	觀測起始時間	觀測結束時間
MS	馬仕	22.61089	120.633	20151113	20181012
TW	灣丘	23.18502	120.5286	20061101	20190904
TT	卑南	22.81765	121.0799	20061101	
YL	玉里	23.3924	121.2973	20070528	20190922
HC	恆春	21.94015	120.8137	20070509	20190916
HL	加灣	24.08111	121.6048	20070411	20190411
PT	瑪家	22.70307	120.6531		20121203
YH	爺亨	24.66952	121.3758	20071102	20181205
SL	雙龍	23.78878	120.9558	20070409	20190301
LY	鯉魚潭	24.34651	120.7802	20060921	20190117
NC	內城	24.71802	121.6829	20070515	20190831
KM	金門	24.44934	118.4527	20151113	20190122
CS	池上	23.1112	121.2264	20140325	20190109
MT	馬祖	26.1697	119.923	20200910	無資訊
LN	蘭嶼	22.0375	121.558	20201010	無資訊
ZB	知本	22.7398	121.0648	20201006	無資訊
XC	新城	24.0383	121.6095	20201006	無資訊
SM	日月潭	23.881	120.9076	20191008	無資訊
KUOL	過嶺	24.96287	121.142	2011-09-22	無資訊
HUAL	華陵	24.67448	121.3677	2012-01-17	無資訊
TOCH	頭城	24.84353	121.8052	2012-02-10	無資訊
ENAN	南澳	24.47582	121.785	2012-02-15	無資訊
SIHU	四湖	23.63698	120.2293	2012-02-08	無資訊
HERM	和美	24.10884	120.5015	2012-02-09	無資訊
CHCH	將軍	23.21966	120.1618	2012-02-29	無資訊
DAHU	大湖	24.41058	120.9024	2012-02-07	無資訊
KAOH	高雄	22.6577	120.2893	2012-02-23	無資訊
PULI	埔里	23.92076	120.9788	2012-03-01	無資訊
SHRL	士林	25.15589	121.5619	2012-03-29	無資訊
SHCH	新城	24.11832	121.625	2012-04-02	無資訊
FENL	鳳林	23.71556	121.4112	2012-04-03	無資訊
YULI	玉里	23.32472	121.3181	2012-04-24	無資訊
RUEY	瑞源	22.97325	121.1557	2012-04-23	無資訊
LIOQ	六龜	23.03211	120.6632	2012-07-03	無資訊
LISH	梨山	24.25319	121.2551	2012-11-07	無資訊
DABA	達邦	23.45346	120.7489	2013-02-01	無資訊
WANL	萬巒	22.59093	120.5937	2012-12-20	無資訊
FENG	楓港	22.20433	120.7007	2012-12-20	無資訊
HUZS	磺嘴山	25.19905	121.6006	2020-07-29	無資訊

表 2 MagTIP 演算法的模型參數向量 g 數值範圍

參數	單站參數									聯合測站參數
	M_c	R_c	A_{thr}	N_{thr}	P_{thr}	T_{thr}	T_{obs}	T_{lead}	T_{pred}	NP_{mod}
數值範圍	5	20-100	1-10	1-2	0.1-0.5	$P_{thr} \times T_{obs}$	5-100	0-100	1	500
單位		km				days	days	days	days	個模型

表 3 濾波頻段一覽表。

濾波組別	帶通頻段	週期範圍	附註
ULF_A	0.00100 - 0.0030 Hz	1000-333 s	
ULF_B	0.00100 - 0.0100 Hz	1000-100 s	
BP_35	0.00032 - 0.0178 Hz	3162-56 s	$10^{-3.5} \leq f \leq 10^{-1.75}$ Hz
BP_40	0.00010 - 0.0178 Hz	10000-56 s	$10^{-4.0} \leq f \leq 10^{-1.75}$ Hz

表 4 在 17 個測試區間、3 種場景下，模型能涵蓋之最少與最多的可能目標地震數量。

ID	Forecasting Phase	Number of EQK (min, max) for trial		
		mix	GE	GM
1	20150402-20150928	(1, 2)	(1, 2)	(0, 0)
2	20151002-20160329	(7, 11)	(5, 7)	(7, 10)
3	20160402-20160928	(8, 8)	(8, 8)	(8, 8)
4	20161002-20170330	(1, 5)	(1, 3)	(0, 4)
5	20170402-20170928	(1, 4)	(1, 3)	(1, 4)
6	20171002-20180330	(23, 23)	(23, 23)	(23, 23)
7	20180402-20180928	(1, 2)	(1, 2)	(1, 1)
8	20181002-20190330	(6, 7)	(6, 7)	(3, 4)
9	20190402-20190928	(5, 7)	(5, 7)	(4, 5)
10	20191002-20200329	(2, 5)	(2, 5)	(1, 1)
11	20200402-20200928	(1, 3)	(1, 3)	(1, 1)
12	20201002-20210330	(5, 11)	(4, 6)	(2, 7)
13	20210402-20210928	(19, 19)	(6, 14)	(16, 16)
14	20211002-20220330	(14, 16)	(13, 15)	(10, 12)
15	20220402-20220928	(21, 26)	(19, 22)	(19, 22)
16	20221002-20230330	(7, 8)	(6, 8)	(4, 5)
17	20230402-20230619	(1, 1)	(1, 1)	(0, 0)

表 5 個案分析事件代號與描述一覽表。

代號	描述	對應圖片
H1	主震發生於 2022 年 3 月 23 日、長濱鄉近海，規模 6.7 深度 25.7 公里。	圖 11
H2	主震發生於 2022 年 6 月 20 日、光復鄉，規模 6.0 深度 6.8 公里。	圖 12
H3	主震發生於 2023 年 2 月 7 日在秀林鄉，深度 10 公里，規模 5。	圖 15
H4	主震發生於 2023 年 3 月 21 日、萬榮鄉，深度 7.2 公里，規模 5.3。	圖 16
H5	主震發生於 2023 年 5 月 4 日、卓溪鄉，深度 14.5 公里，規模 5.1。	圖 17
T1	發生於 2022 年 3 月 22 日臺東外海，深度 25.95 公里，規模 5.55 的地震。	圖 18
T2	主震發生於 2022 年 9 月 18 日池上，深度 7.8 公里，規模 6.8 的地震。	圖 19 至圖 21
T2a	2022 年 9 月發生於玉里及富里鄉，應為 2022 年 9 月臺東地震(T1)的餘震。	圖 13、圖 14
T3	2022 年 11 月至 12 月發生於臺東近海，深度 7 至 10 公里，規模 5.2 至 5.4 的地震。	圖 22 至圖 23
T4	2022 年 12 月 24 日發生於池上鄉，深度約 10 公里，規模約 5.1 的地震。	圖 24
O1	2022 年 3 月 19 日，發生在南投縣竹山鎮，深度 15.1 公里，規模 5.1 的地震。	圖 25
O2	2022 年 6 月 28 日，臺灣西南部海域深度 40.2 公里、最大規模 5.0 的地震。	圖 26
O3	2023 年 2 月 18 日，南投縣鹿谷鄉深度 18.2 公里，規模 5.0 的地震。	圖 27

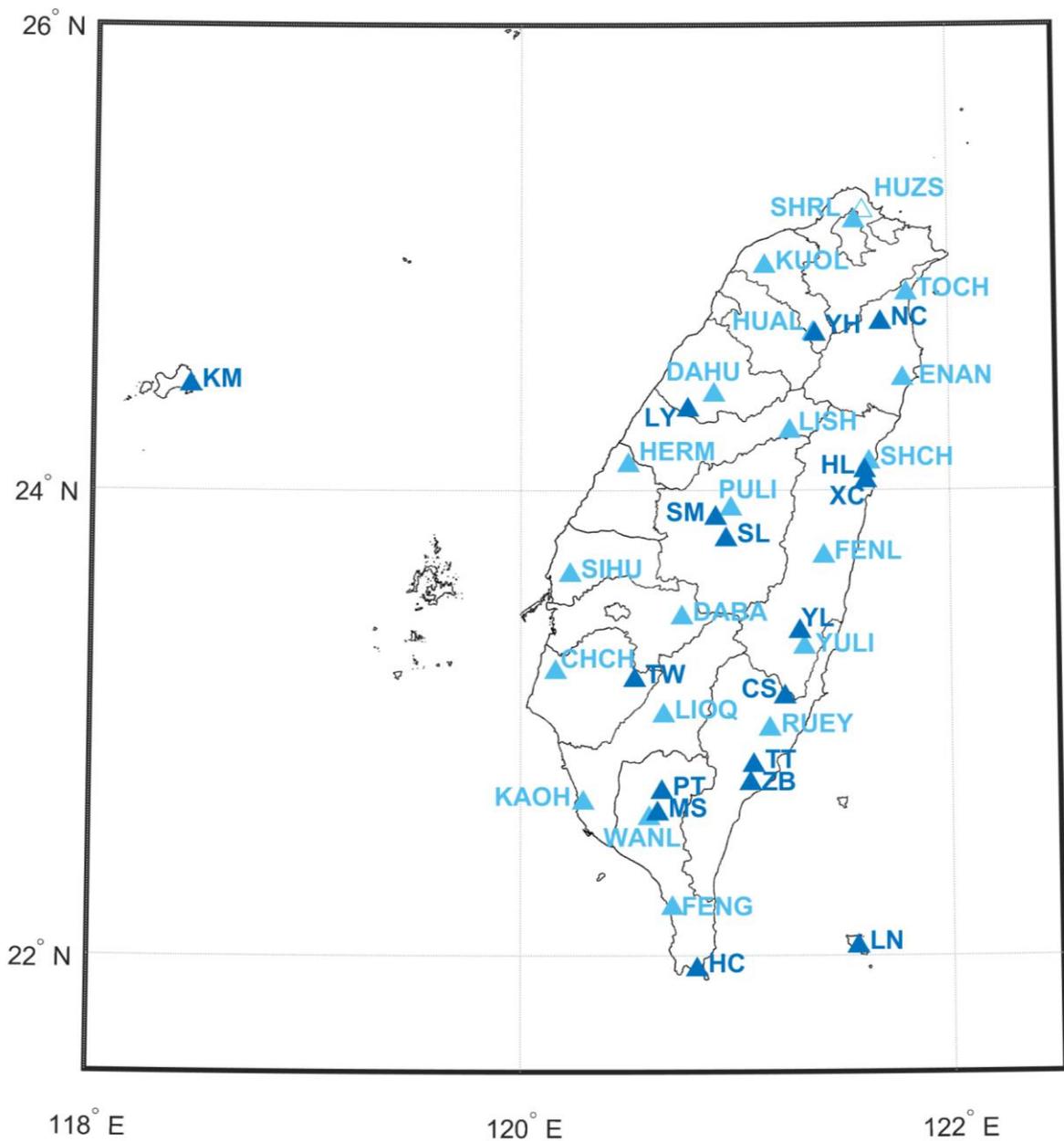


圖 1 中央氣象署地電與地磁觀測站一覽圖。其中，地磁站以深藍色顯示，地電站以淺藍色顯示。測站以空心符號標示者為本期報告未使用之測站。

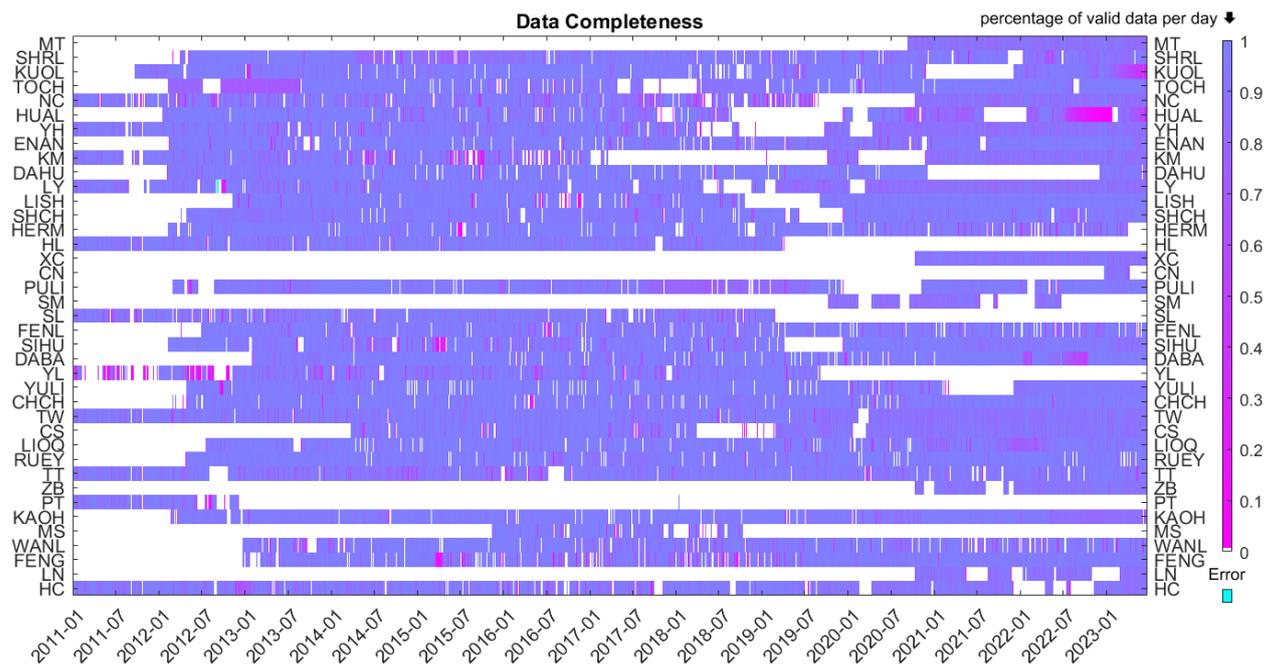


圖 2 使用之測站資料一覽。每日有效資料點數之比例以色階標示，完全無資料的日子呈現白色。測站軸之測站代碼依測站緯度由高至低(北至南)排列。

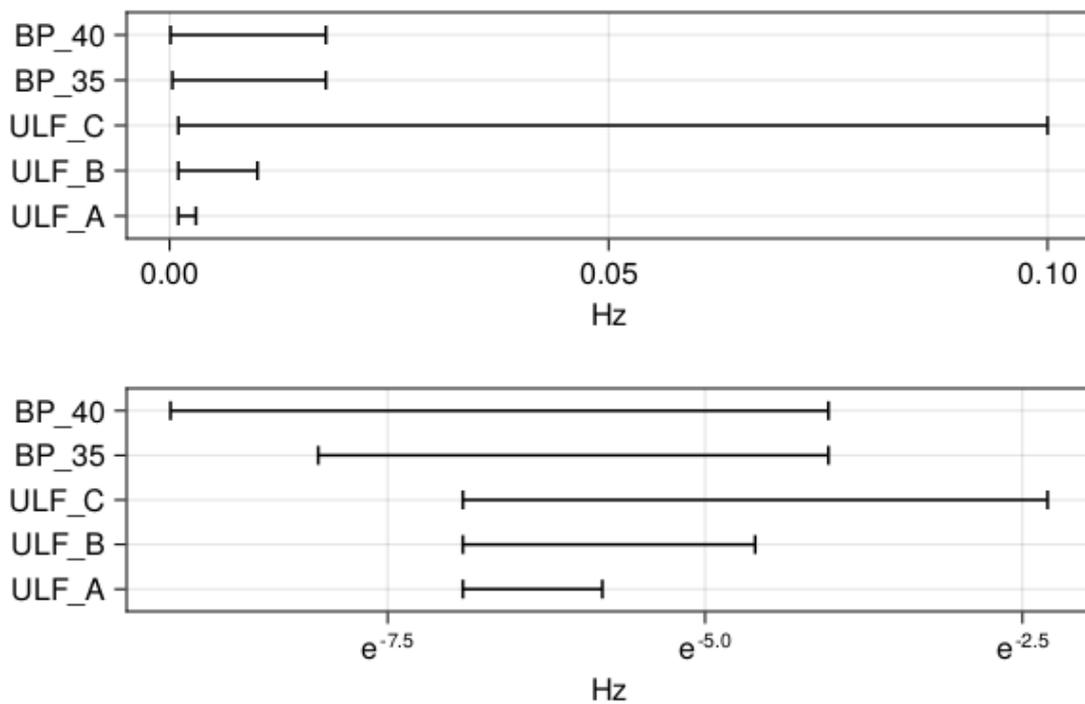


圖 3 本研究所涉之濾波頻段視覺化參考圖。(上：linear scale；下：log scale)。

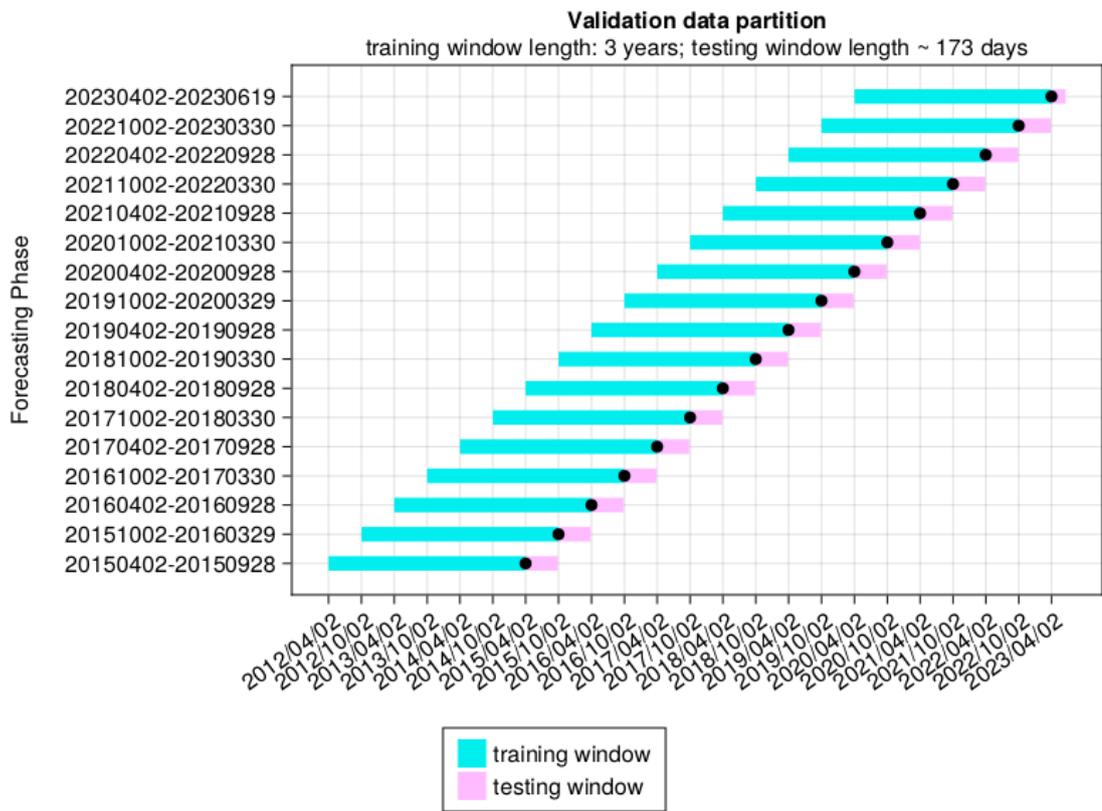


圖 4 三年訓練期組別、各驗證資料集的訓練期與預報(測試)期所對應之時間區段。

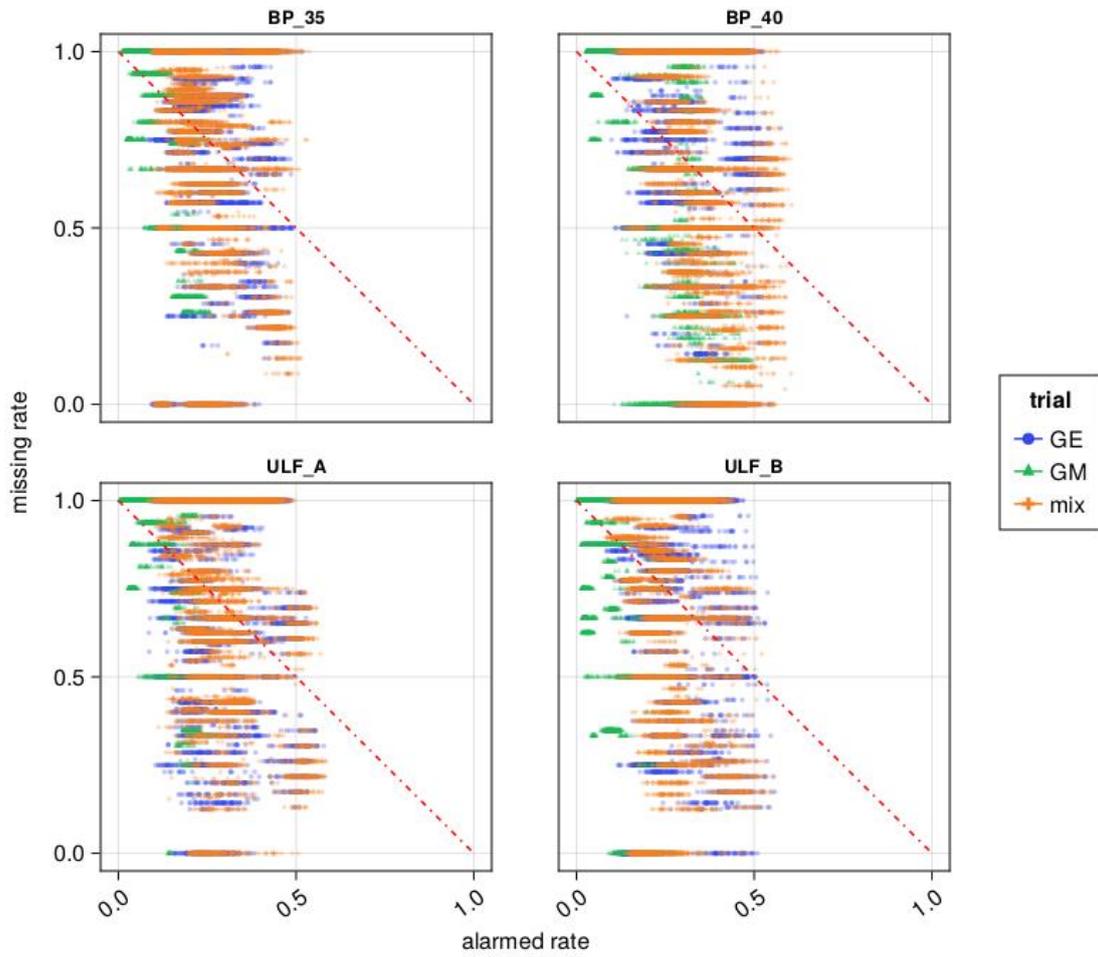


圖 5 三組聯合測站組合在 17 個測試區間內，每組/區間各 500 個聯合測站模型 ($NP_{mod} = 500$) 的 TIP 的預警率(alarmed rate)對目標地震 EQK 的遺漏率(missing rate)。不同之聯合測站組合(GE: 僅使用地電站; GM: 僅使用地磁站; mix: 地電與地磁皆使用)的結果分別以不同的顏色/符號標示。

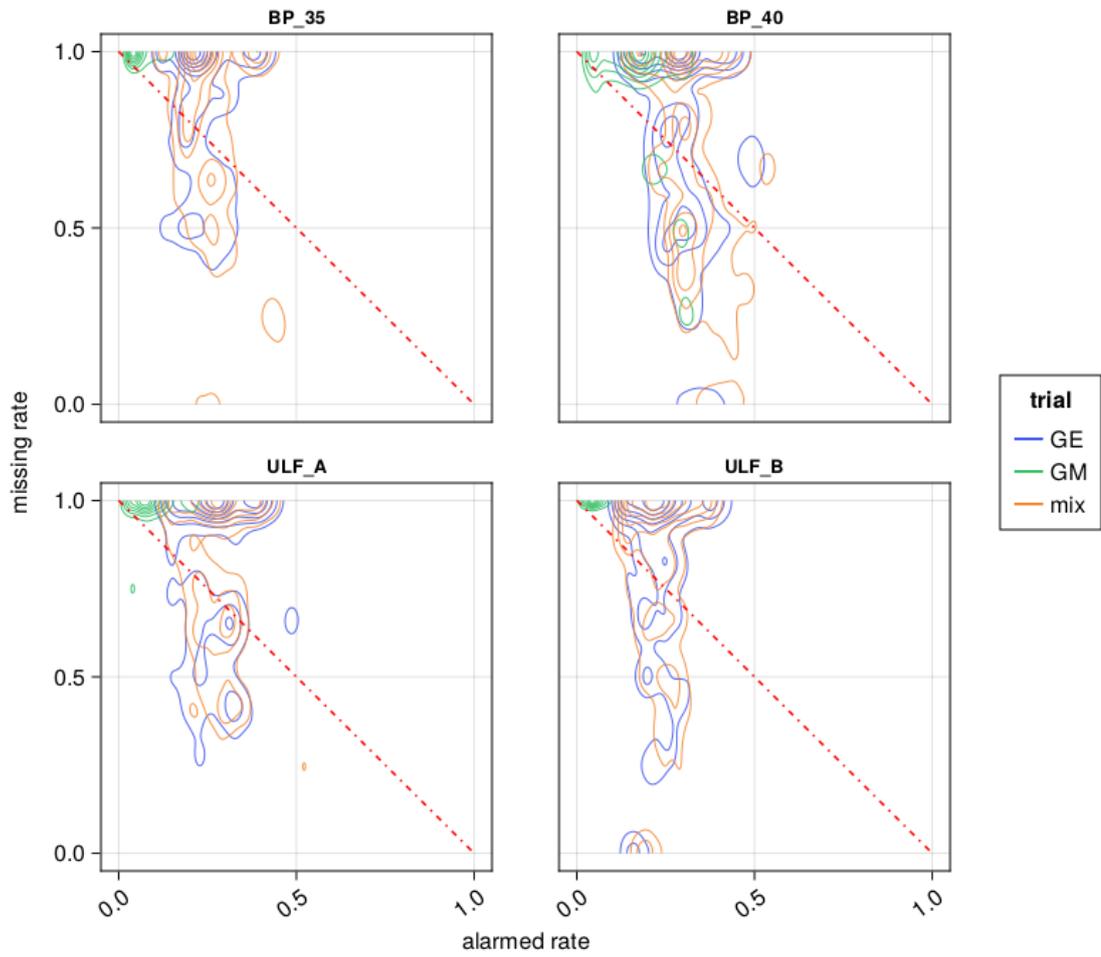


圖 6 承圖 5，以等高線圖標示三種場景的模型在莫昌爾圖表上之機率密度。不同之聯合測站組合(GE: 僅使用地電站；GM: 僅使用地磁站；mix: 地電與地磁皆使用)的結果分別以不同的顏色/符號標示。

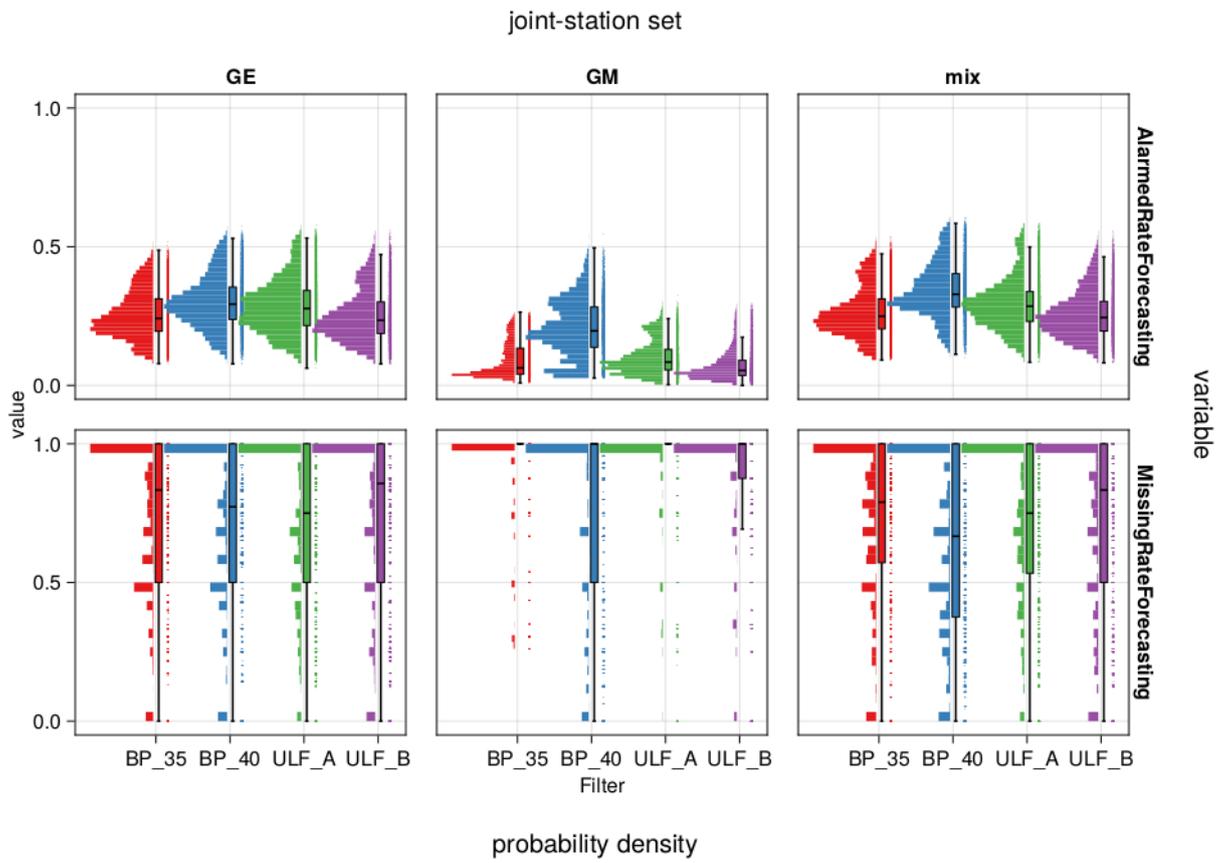


圖 7 TIP 預警率(alarmed rate)與 EQK 遺漏率(missing rate) 在所有測試區間的統計分布，以雲雨圖(raincloud plots)顯示。不同之聯合測站組合(GE: 僅使用地電站；GM: 僅使用地磁站；mix: 地電與地磁皆使用)分別顯示於不同的子圖。

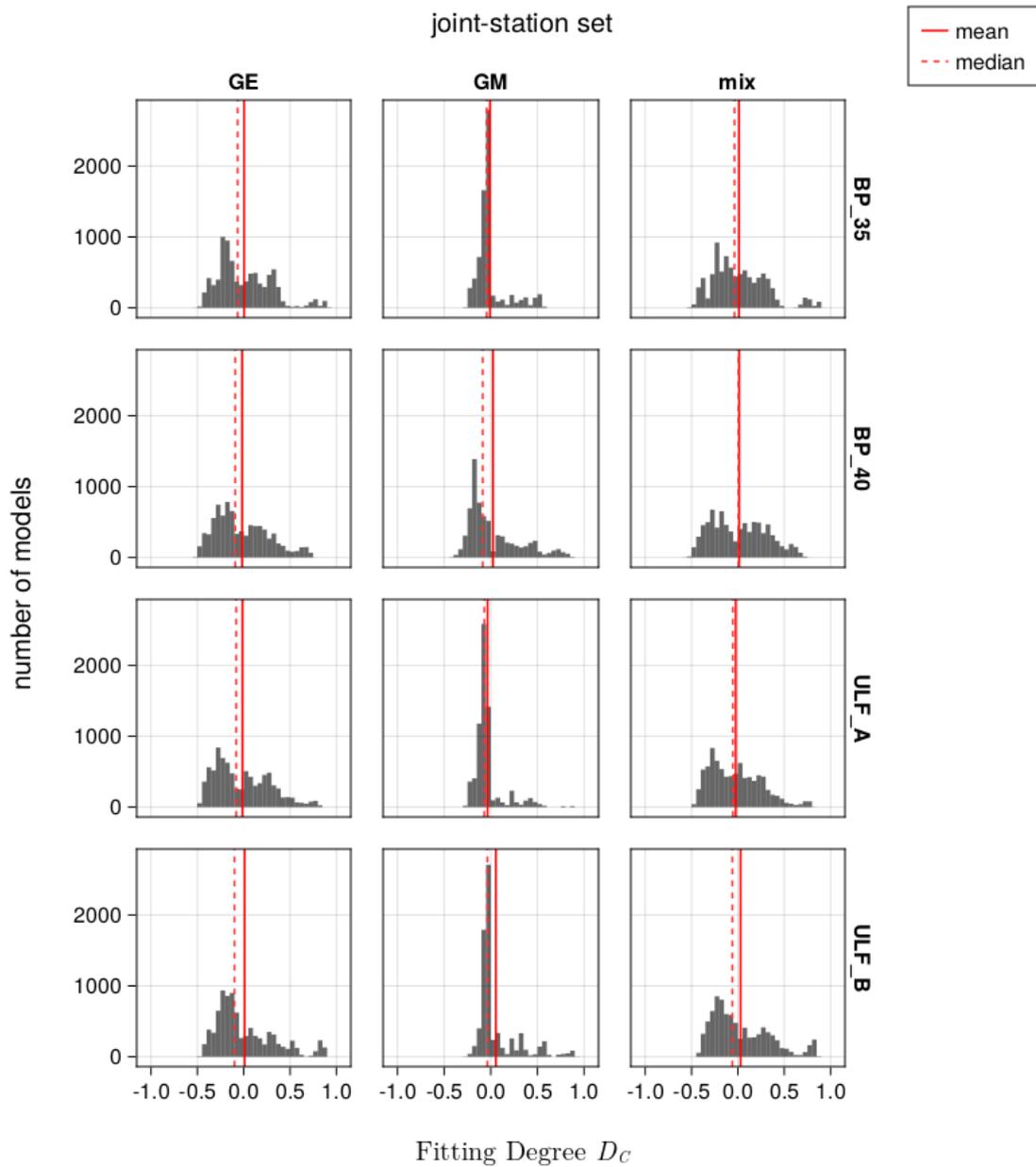


圖 8 擬合程度(D_C) 在所有測試區間的統計分布，以直方圖(histograms)顯示。不同之聯合測站組合(GE: 僅使用地電站；GM: 僅使用地磁站；mix: 地電與地磁皆使用)分別顯示於不同的子圖。

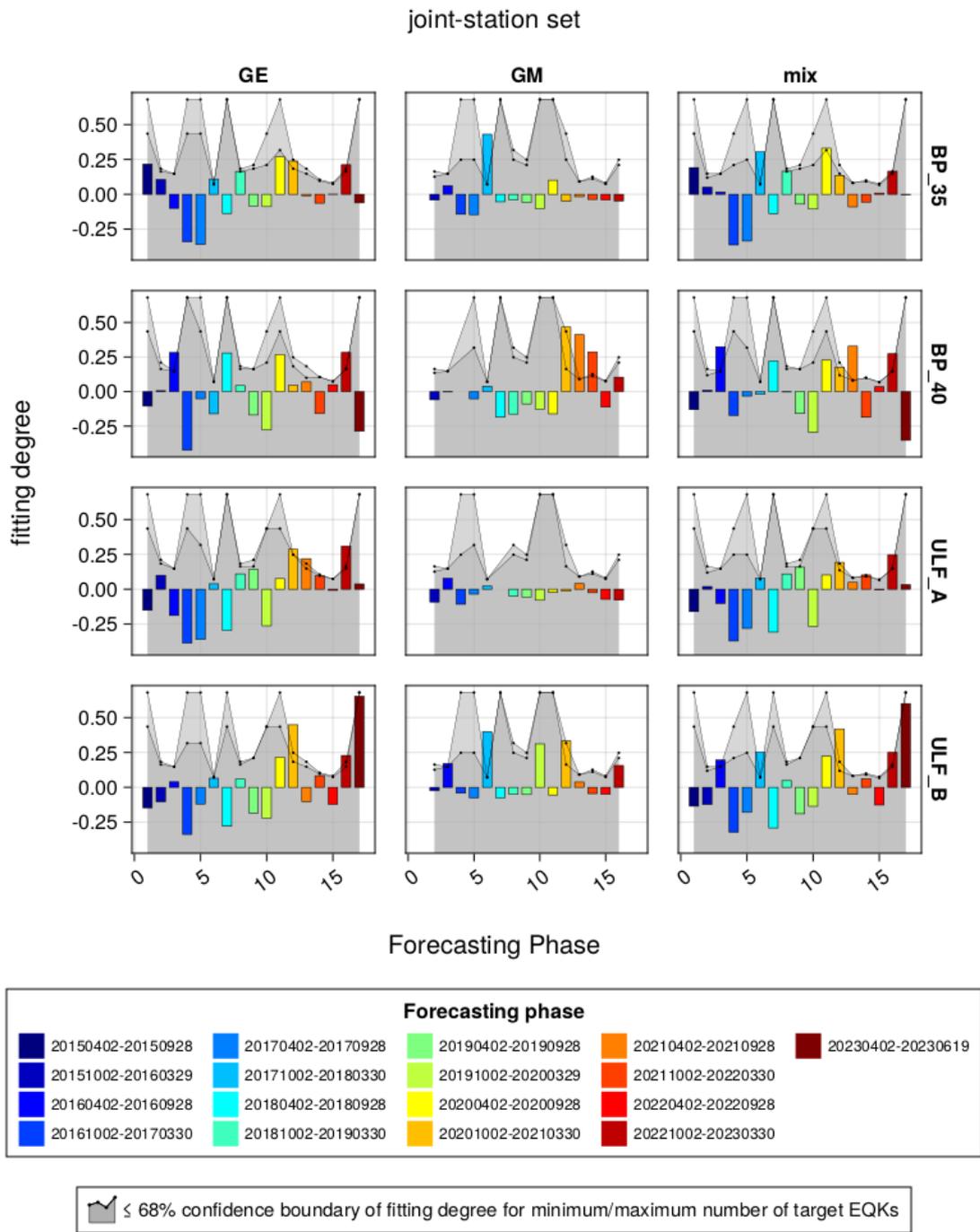


圖 9 擬合程度 (fitting degree) 在基於各頻段濾波、各測試區間 (forecasting phase) 內 500 組模型之平均值，以長條圖 (bar plot) 顯示。68% 信賴邊界以散點折線 (scatter-line) 圖標示。不同之聯合測站組合(GE: 僅使用地電站; GM: 僅使用地磁站; mix: 地電與地磁皆使用) 分別顯示於不同的子圖。

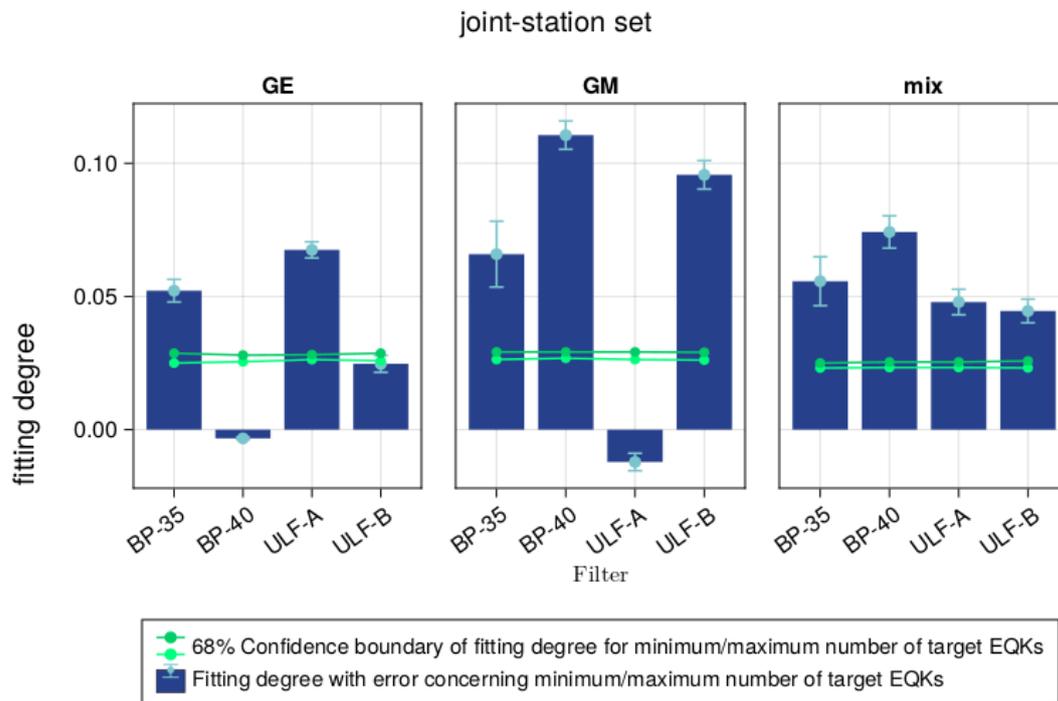


圖 10 承圖 9，根據據測試區間 2015-04-02 至 2023-03-30 內的總預警面積、總目標地震數量以及總命中地震數量所計算得到之擬合程度，以長條圖標示。68% 信賴邊界以散點折線(scatter-line)圖標示。

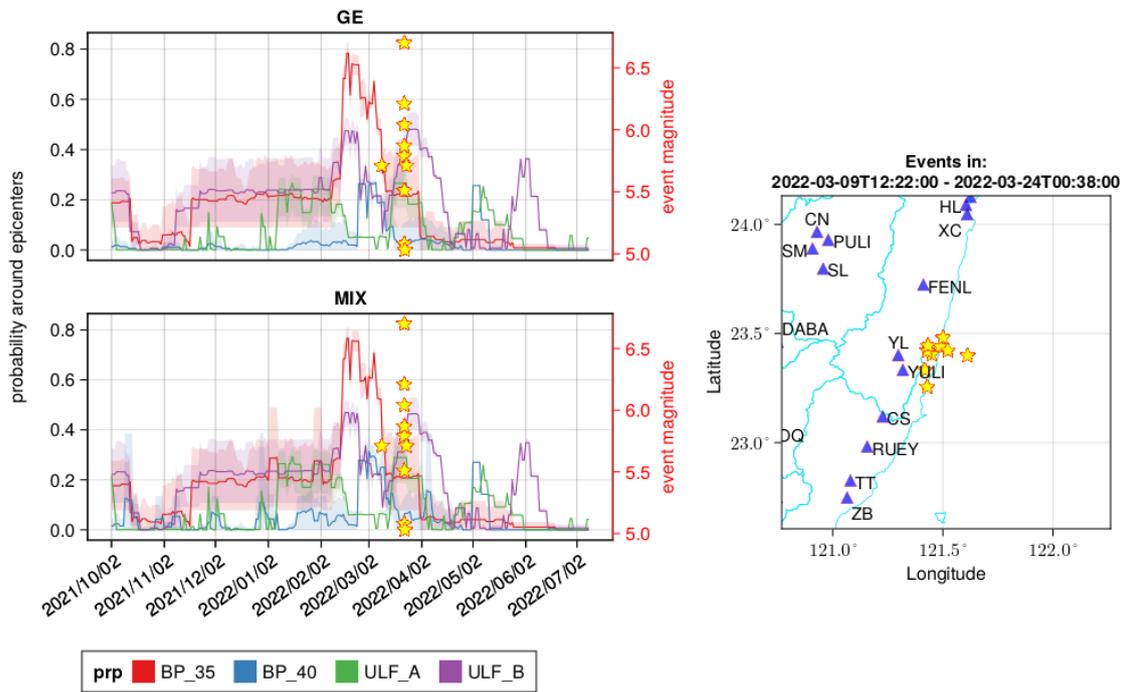


圖 11 [H1]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

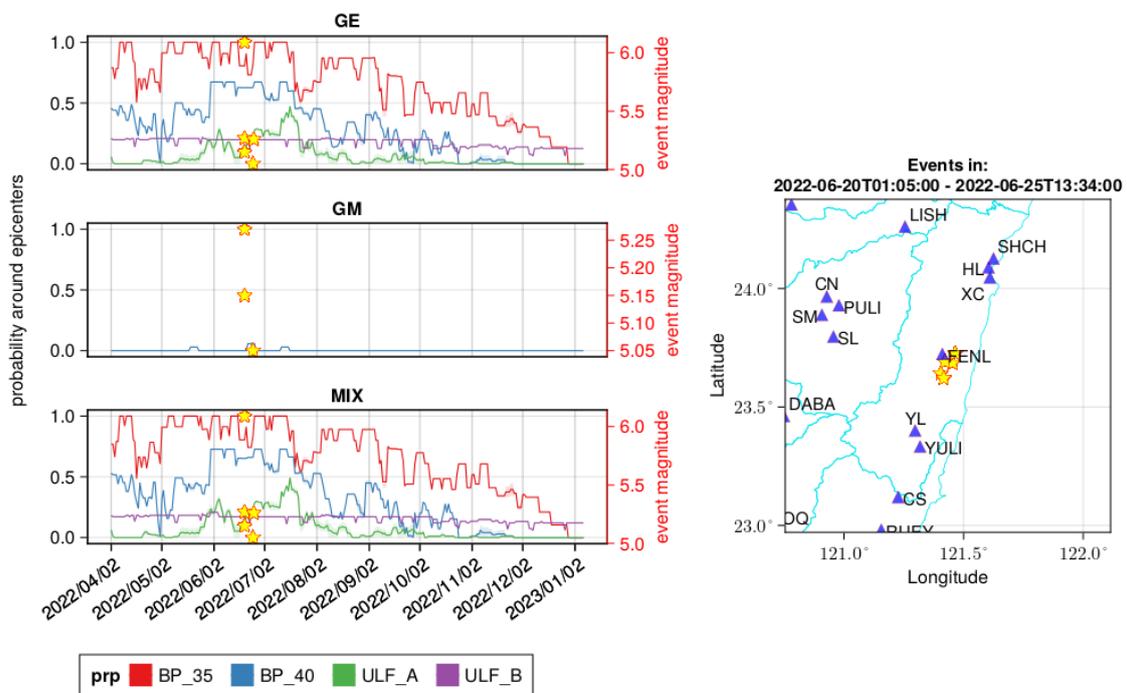


圖 12 [H2]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

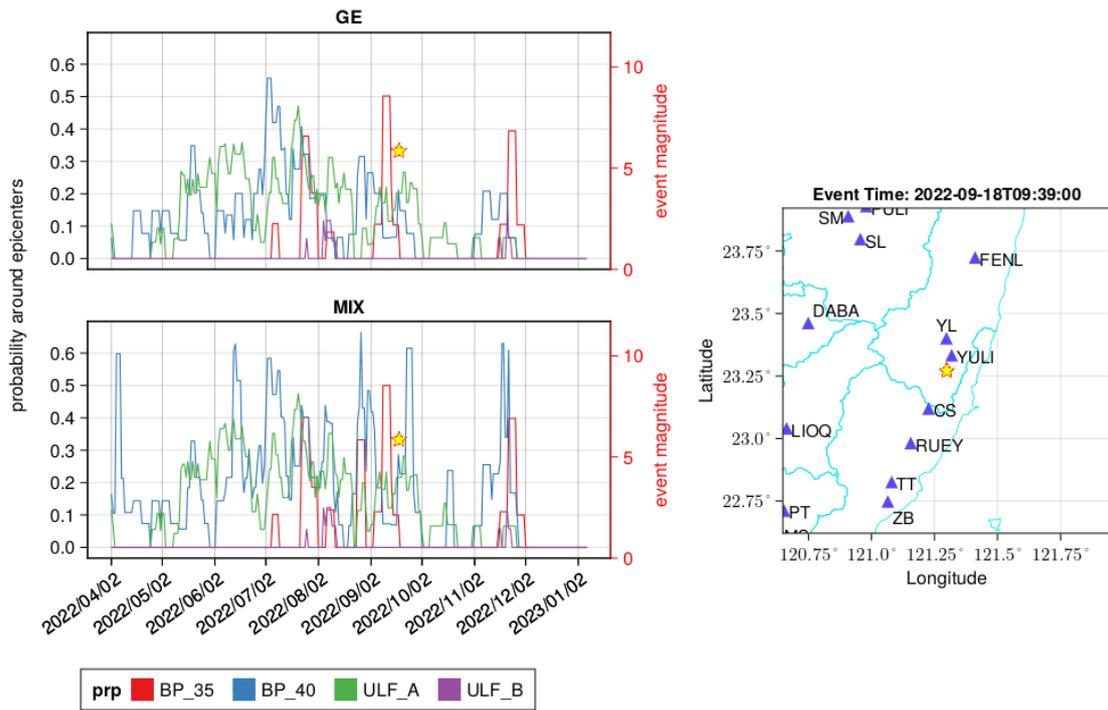


圖 13 [T2a]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

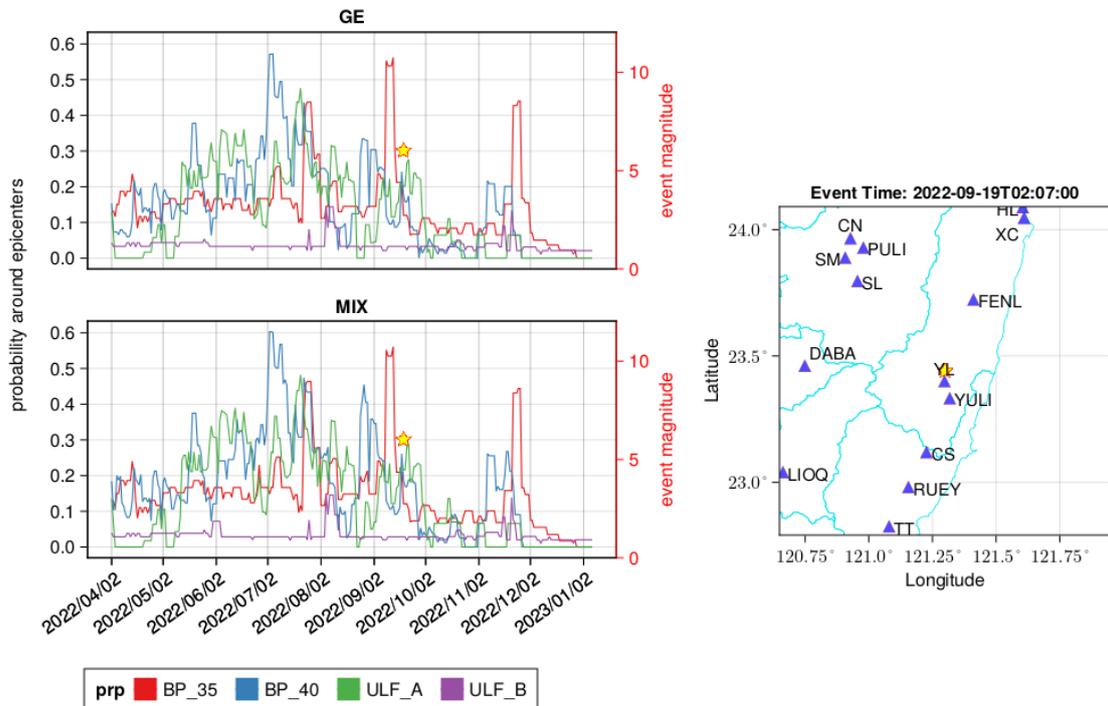


圖 14 [T2a]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

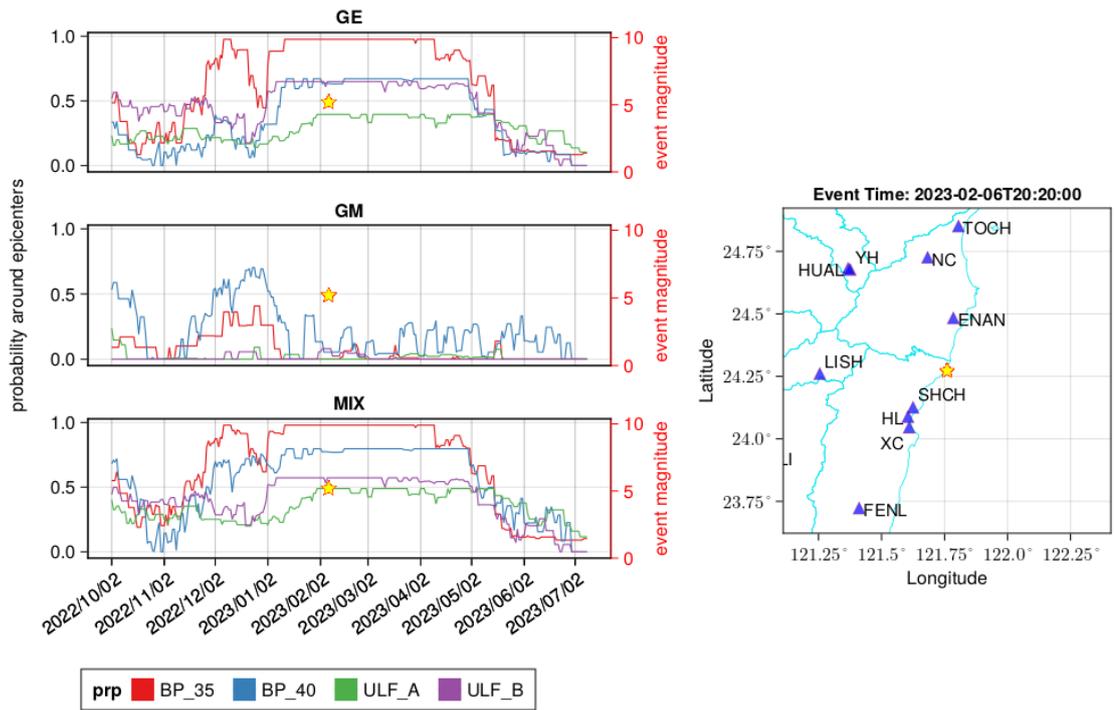


圖 15 [H3]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

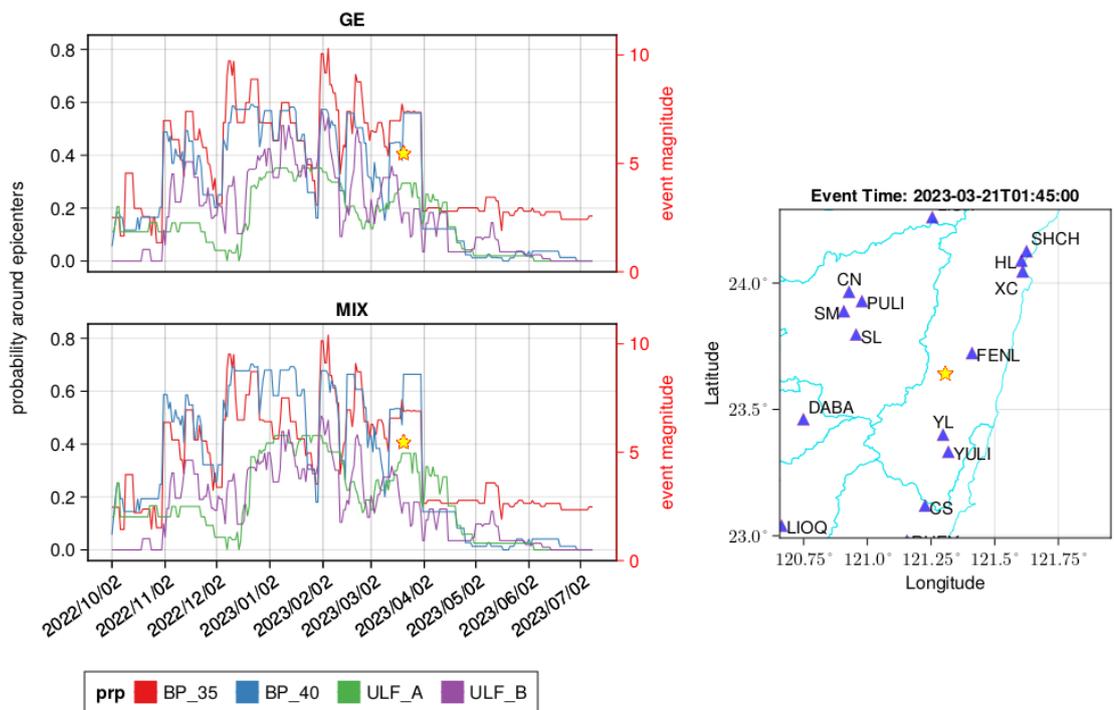


圖 16 [H4]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

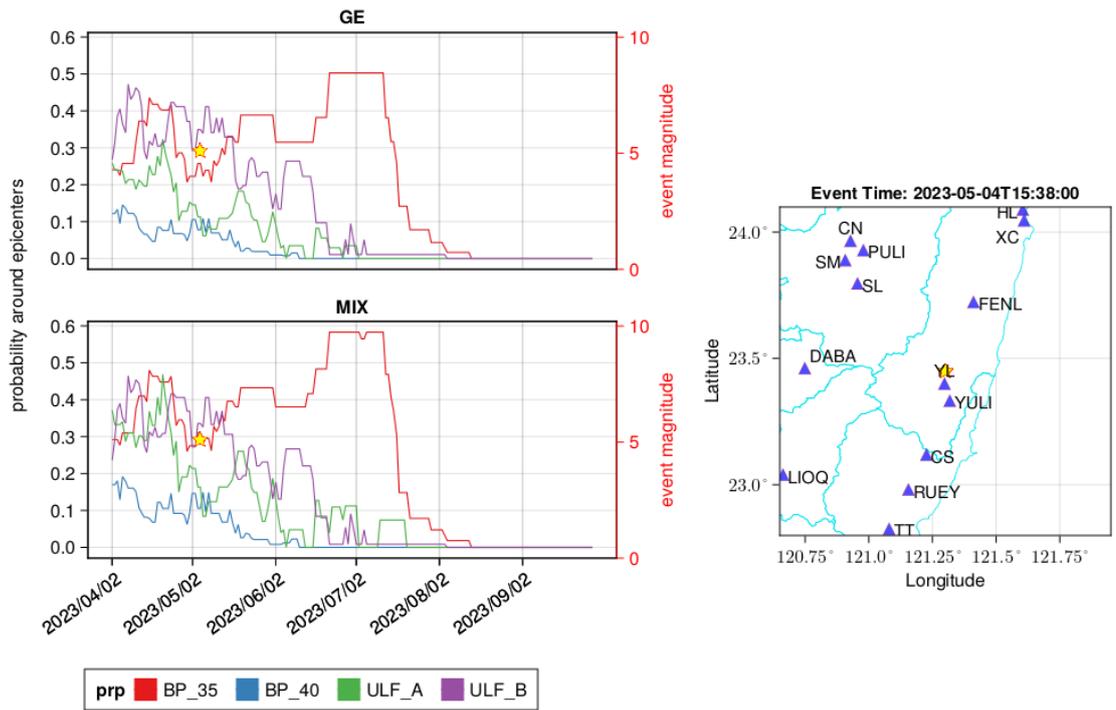


圖 17 [H5]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

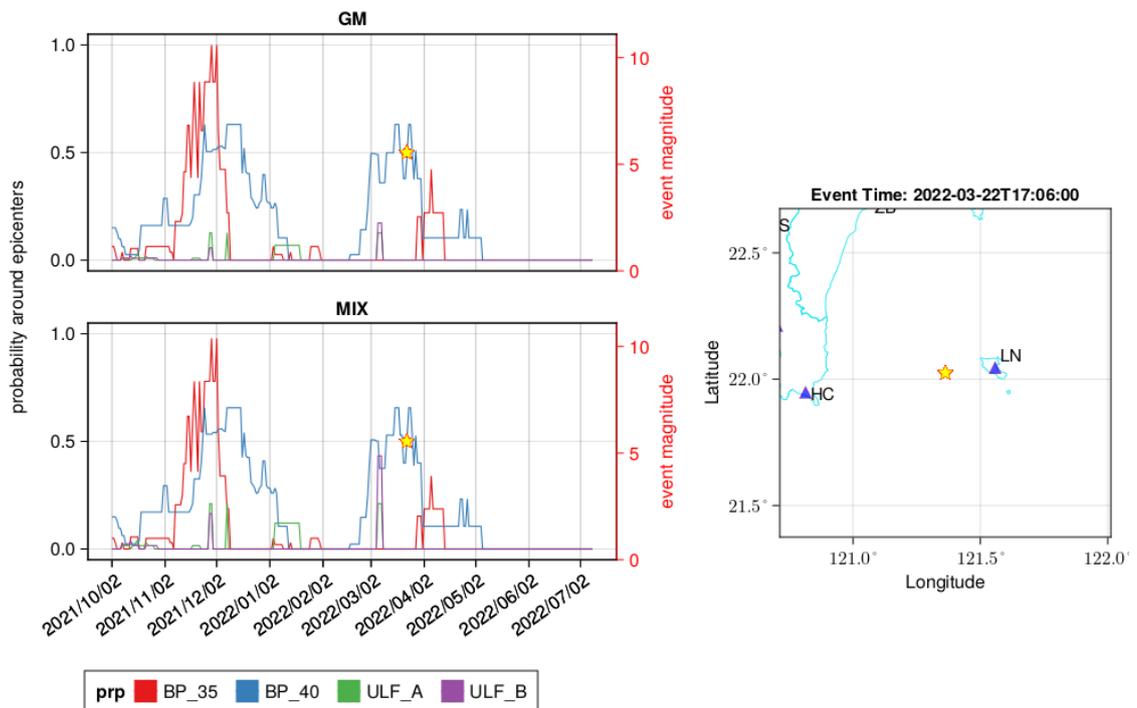


圖 18 [T1]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

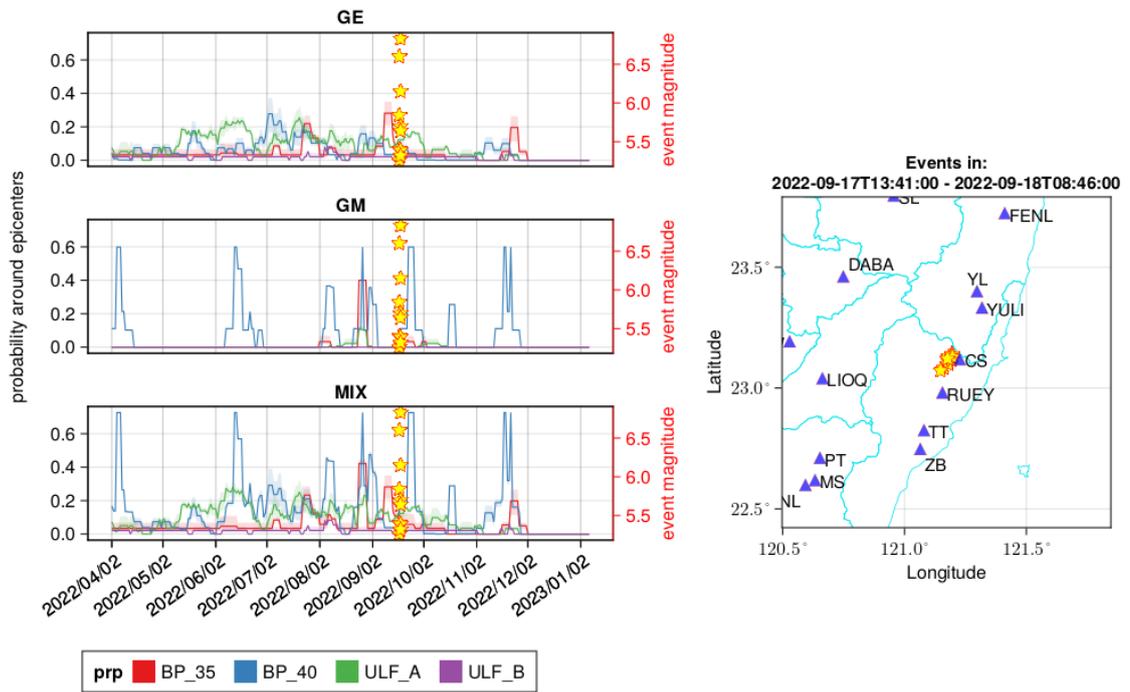


圖 19 [T2]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

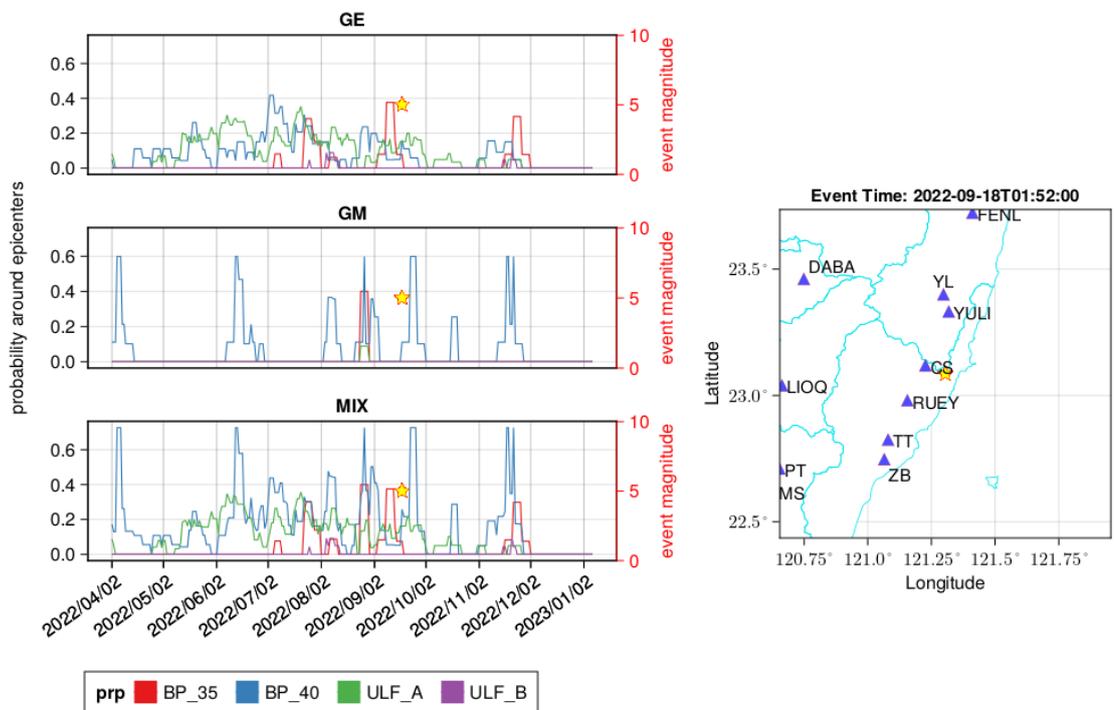


圖 20 [T2]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

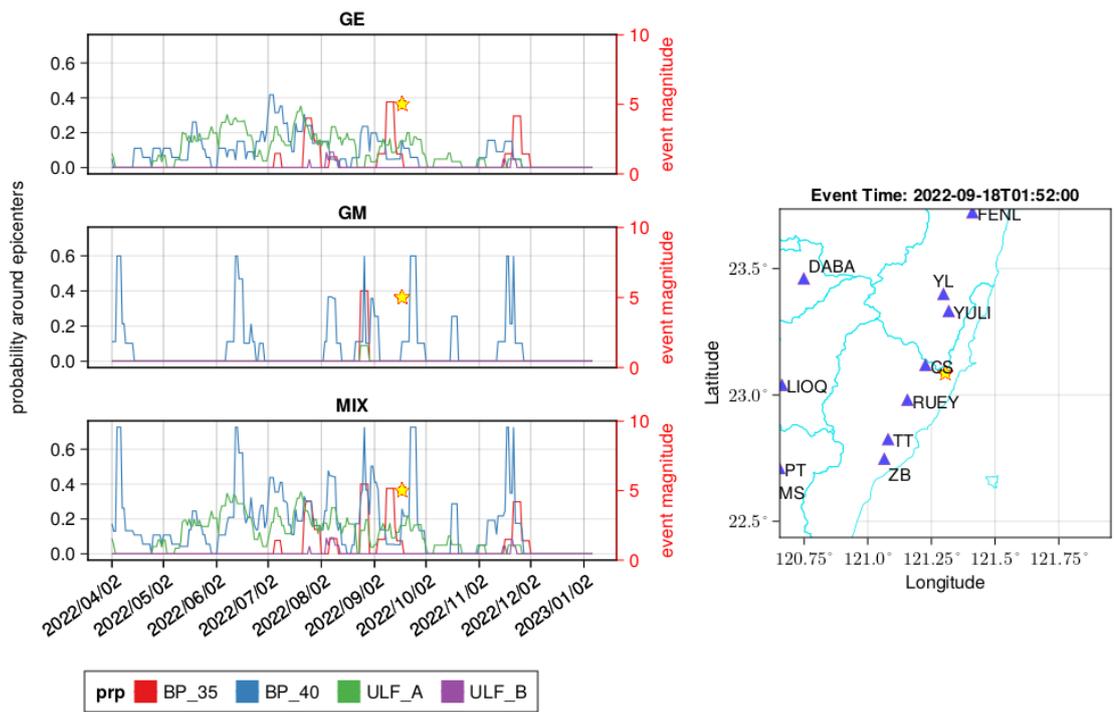


圖 21 [T2]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

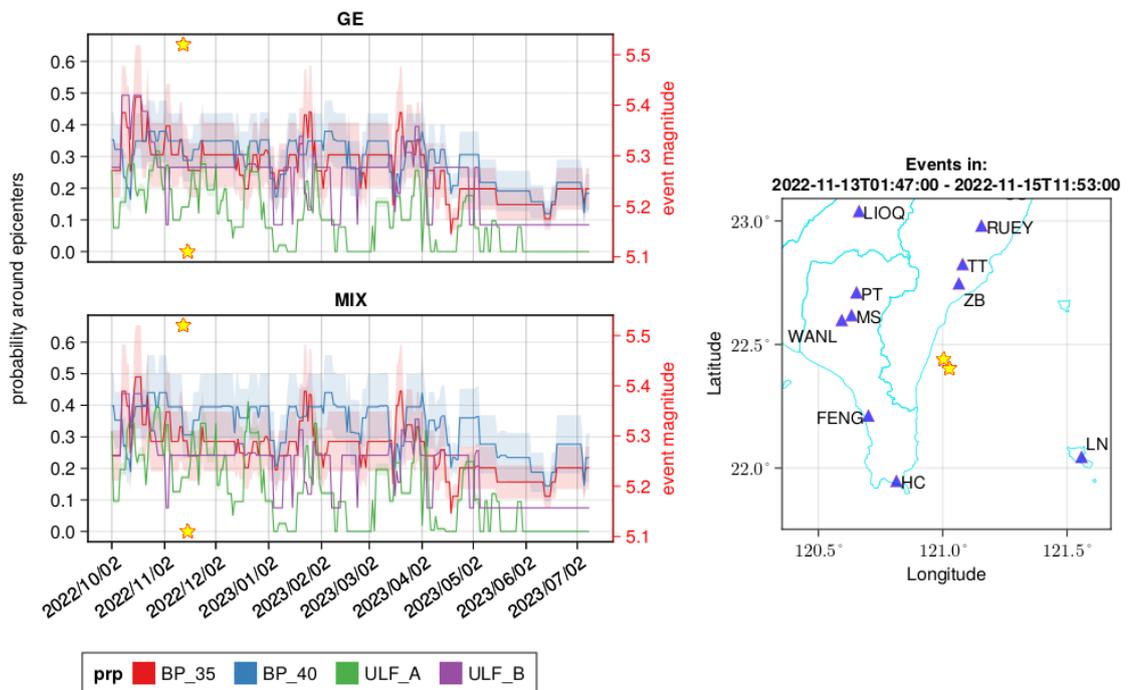


圖 22 [T3]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

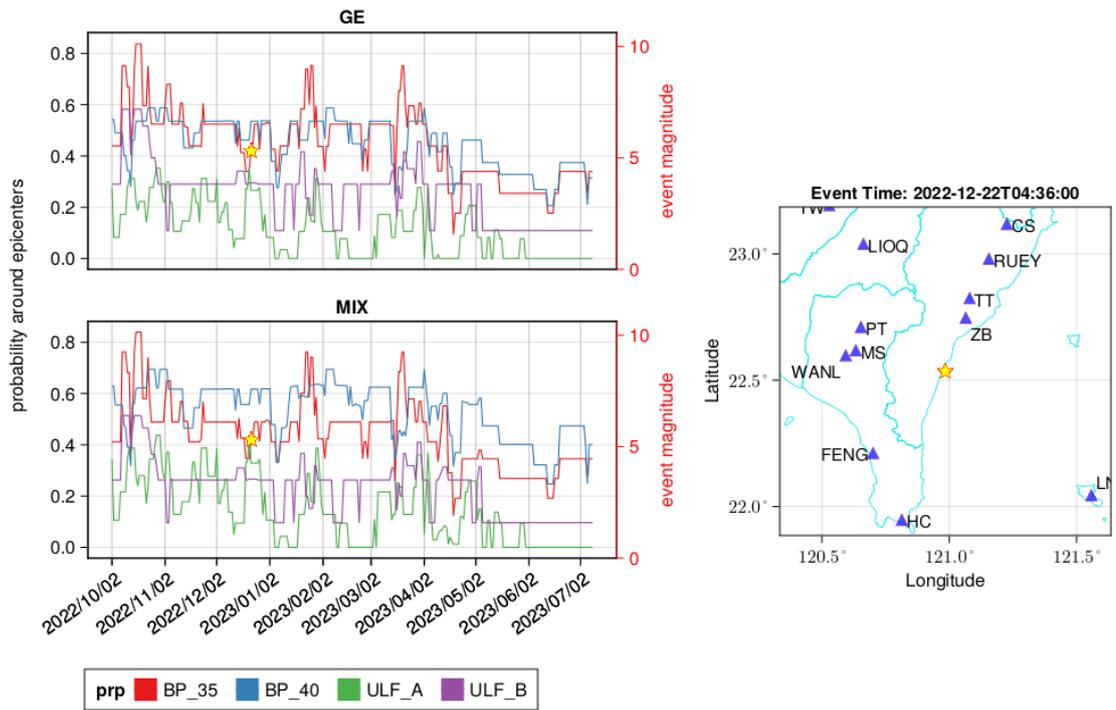


圖 23 [T3]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

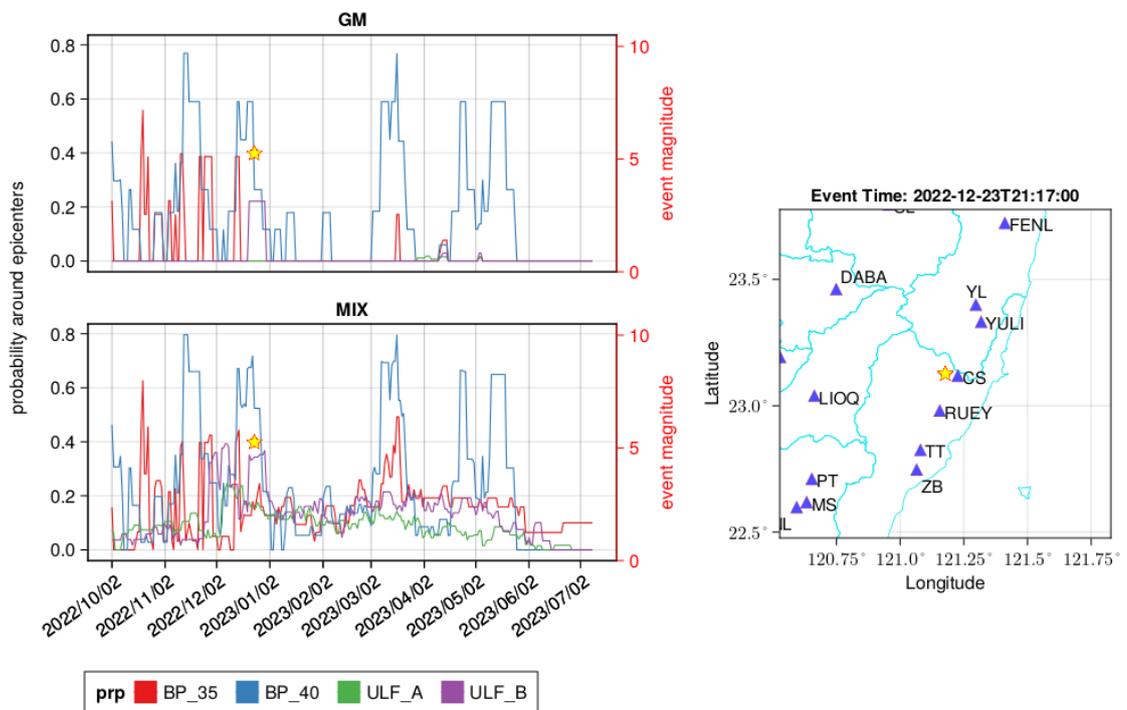


圖 24 [T4]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

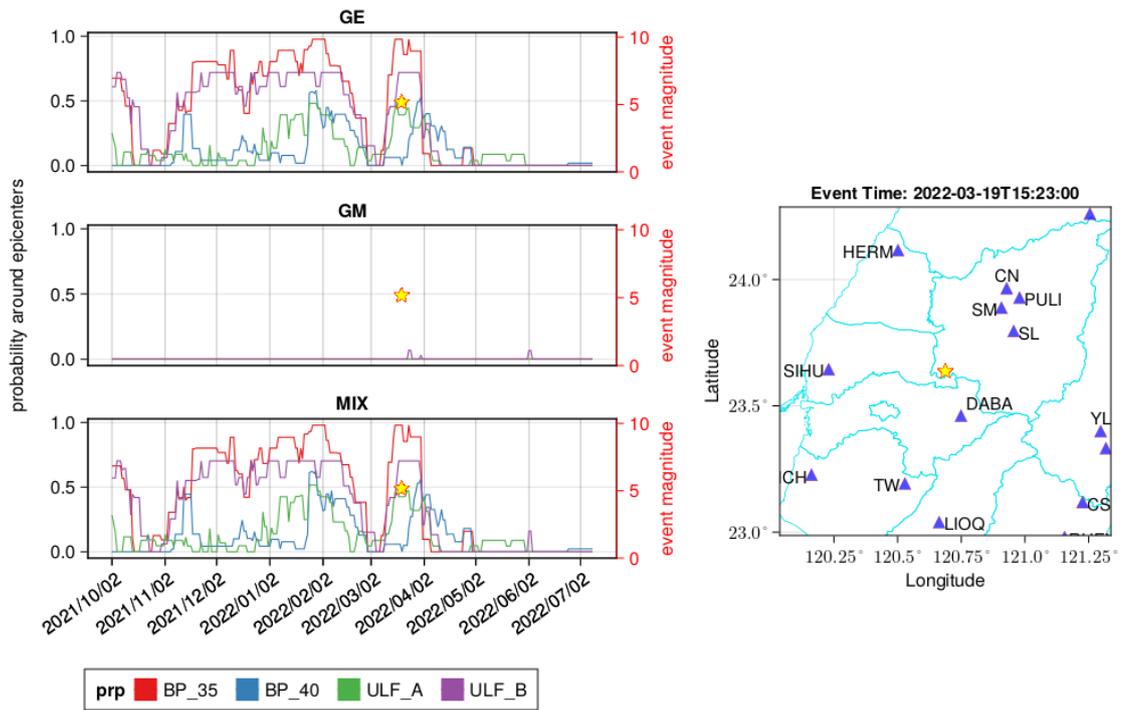


圖 25 [O1]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

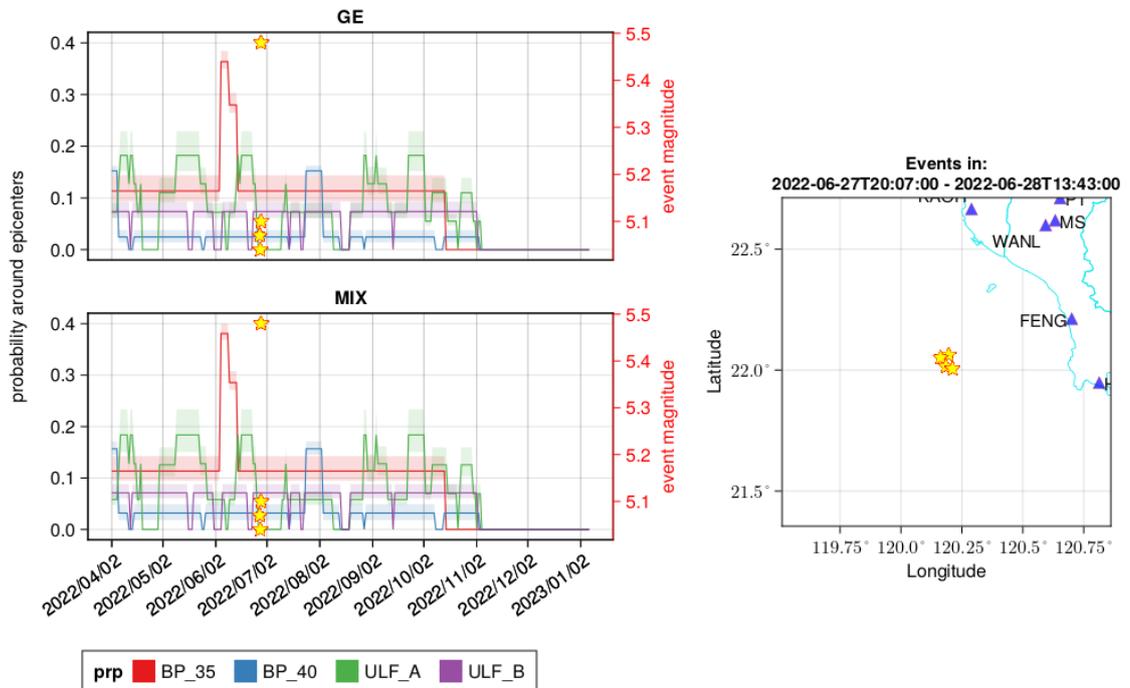


圖 26 [O2]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

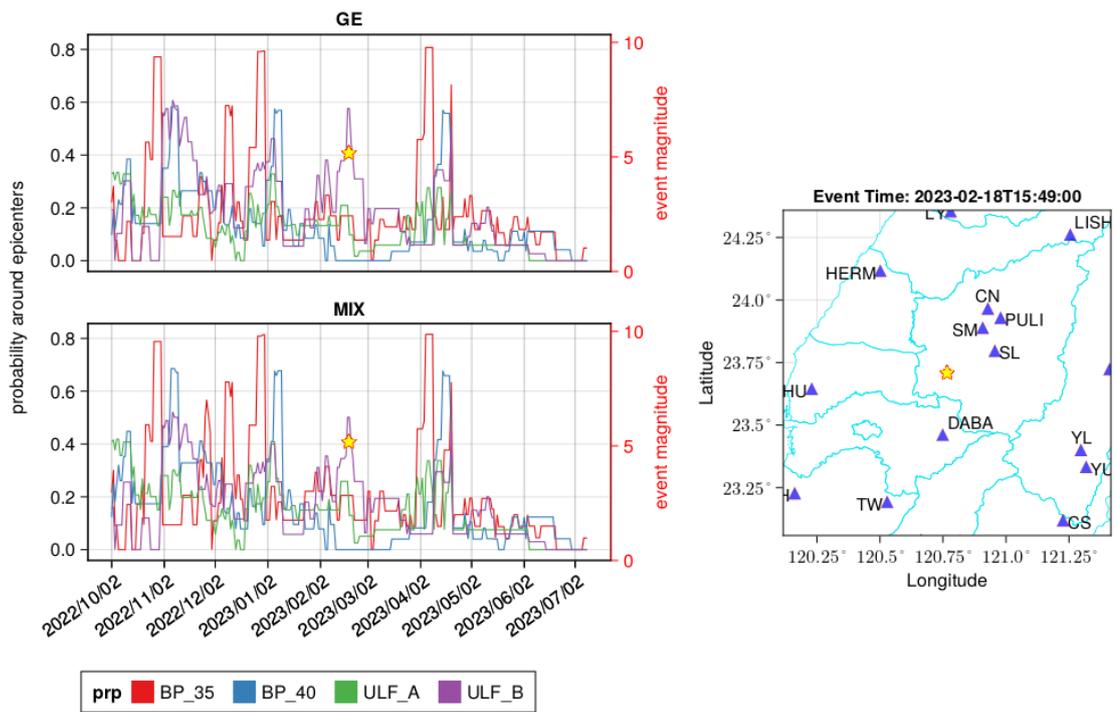


圖 27 [O3]不同場景下(GE、GM 或 mix)，經各濾波頻段的模型於震央附近的預報機率時序圖。圖中鄰近複數個地震事件的預報機率之上、下界以半透明帶狀圖標示。

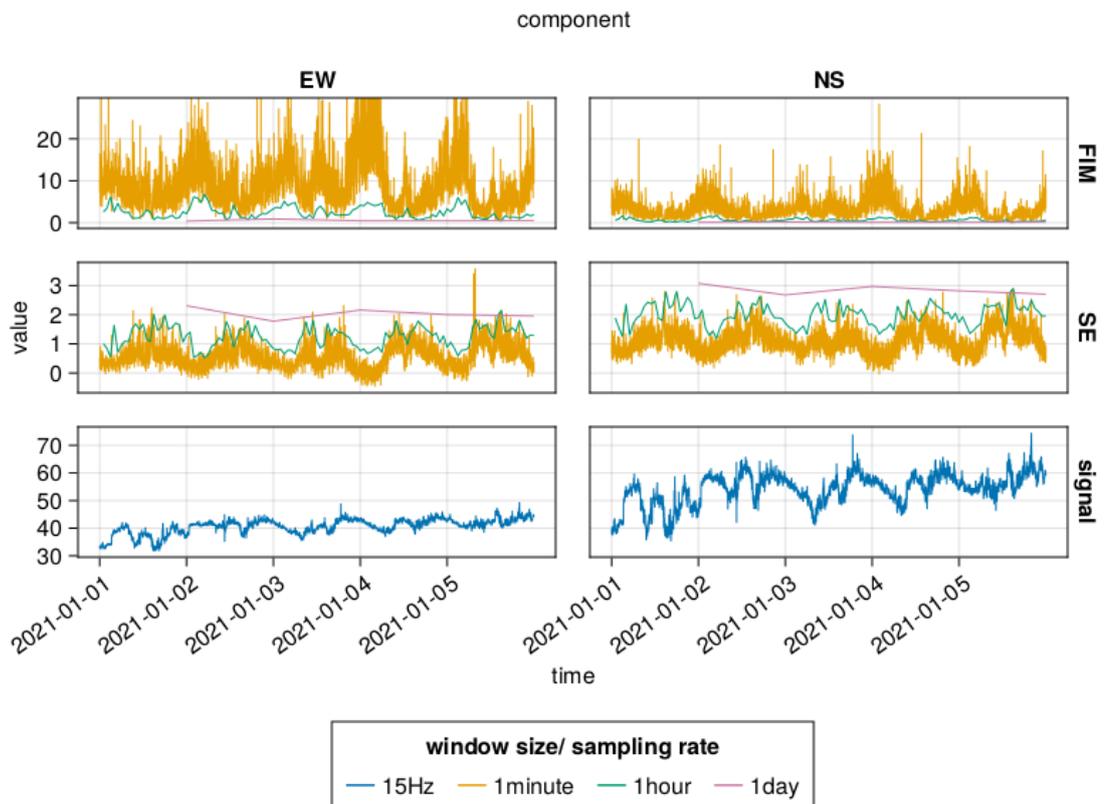


圖 28 將軍(CHCH)地電站訊號(signal)的 1 分鐘、1 小時、1 日時間窗內的費雪訊息(FIM)與夏農熵(SE)的計算結果範例。

臺灣地區 112 年地震前兆監測資料彙整及分析

子計畫三

分析臺灣地區地震前電離層異常特性

陳佳宏 劉正彥 林建宏

國立成功大學地球科學系

一、 中文計畫摘要

上一期計畫研究分析了 1994 年到 2021 年間 698 筆規模大於等於 5 以上地震前電離層異常形態，發現不同地震規模與震源深度會有不同的電離層異常形態。但不管最後結果顯示電離層以正異常或是負異常為主，地震前出現電離層異常的比例大約為 20%-25% 左右，也就是說有大約 7 成以上的地震(特別是規模較小的地震)發生前沒有出現電離層異常。為了要更加了解電離層異常與地震之間的關係，並增進利用電離層前兆的可信度，本計畫將針對不同斷層地震類型進行電離層前兆分析，並配合氣象地面觀測站參數進行分析討論。

關鍵詞：電離層，全電子含量，地震預警

二、 英文計畫摘要

The last project analyzed the ionospheric anomalies before 698 earthquakes with a magnitude greater than and equal to 5 between 1994 and 2021 and found that there are different ionospheric anomalies for different earthquake magnitudes and source depths. However, regardless of whether the results show positive or negative ionospheric anomalies, the proportion of ionospheric anomalies before earthquakes is around 20%-25%, which means that more than 70% earthquakes, especially small earthquakes, do not have ionospheric anomalies before occurrence. In order to better understand the relationship between ionospheric anomalies and earthquakes, and to improve the reliability of using ionospheric precursors, this project will analyze and discuss earthquakes with and without ionospheric anomalies in conjunction with meteorological ground observation station parameters.

keyword: Ionosphere, Total Electron Content (TEC), Earthquake Early Warning

三、 前言，研究目的及意義

在進行 1994 年到 2021 年間規模 5 以上地震前電離層異常時有發現一個現象，針對規模大小相似的地震，電離層有時候會出現正異常(電漿濃度增加)，有時候會出現負異常(電漿濃度減少)，有時候則沒有出現異常(電漿濃度在正常值範圍內)。下圖 1 到圖 3 分別為 1997 年 7 月 15 日 M6.1(EQ1)、2009 年 10 月 3 日 M6.09(EQ2) 以及 2010 年 11 月 21 日日 M6.14(EQ3)地震前後電離層電漿濃度變化情形，相關圖示說明請參考圖 1 的圖說。可以看到三筆地震的規模非常相似，但是地震前電離層的形態則非常不一致。EQ1 於地震前 1 天(7/14)、前 10 天(7/5)出現負異常；EQ2 於地震前 1-2 天(10/2, 10/1)、前 5 天(9/28)、前 8 天(9/25)出現正異常；EQ3 於地震前都沒有出現電離層異常。

目前對於地震前電離層電漿濃度異常可能的物理機制為，在地震孕震期間，因為地層間錯動的關係因而產生電場，當這個電場傳遞到地表時，有機會可以再往高空的電離層傳遞，給予下部電離層(約 100-120 公里)電場外加的電場作用力，將導致電離層中電漿濃度重新分配，造成異常的產生。一般來說，低緯度與赤道地區的下部電離層因為受到東向(eastward)風場作用的關係，會產生東向電場。這個東向電場會與向北的磁力線作用，讓電漿往較高的高度移動(Kelley, 1989)，而越高的高度因為空氣密度越稀薄的關係，電漿不容易被中和消失，因此能夠存活較長的時間。因此，當東向電場增強時，會將更多的電漿帶往更高的高度，電漿濃度也會因此而增加。反之，若東向電場減弱時，則電漿無法長時間的存在，則很快就會消失，造成電漿濃度的減少。

因此，造成電離層電漿增加的正異常很有可能是受到東向電場增強所致，而負異常則很有可能是來自於東向電場減弱。若地表電場傳到下部電離層時為東向的話，則會加強電離層東向電場，反之若是地表電場為西向時，則會減弱電離層東向電場。上述的機制是針對白天的情況，但也適用於晚上的情況。晚上電離層電場方向轉為西向，來自於地表的東向電場會減弱電離層西向電場，讓電漿與中性大氣中和的速率降低，某種程度上來說可視為電離層電漿正異常。反之亦然。

地震前不同的電離層異常特性是由於不同方向的電場傳遞到電離層所造成的，而這些電場有可能因為不同地震形態而有所不同，因此為了要了解地震前電離層異常前兆，並進一步利用電離層前兆預測地震是否會發生，則有必要對地震形態進行分類與研究。本計畫的研究目的是利用中研究AutoBATS所提供之地震震源機制，配合地震發生前地面氣象站參數進行分析，嘗試尋找不同電離層異常的特性。

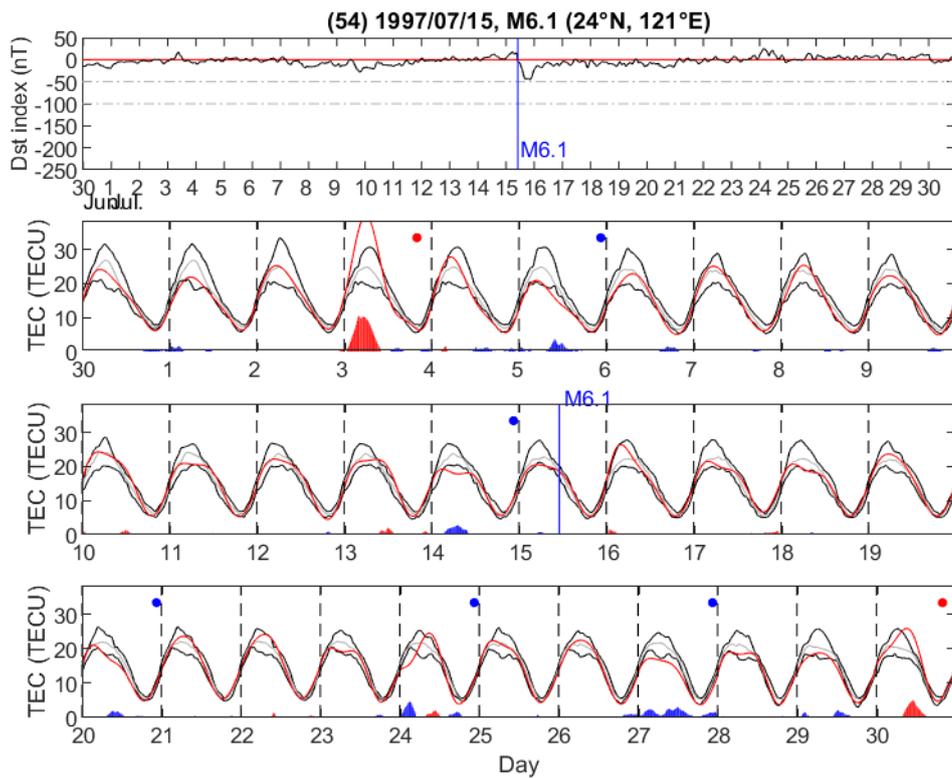


圖1、1997年7月15日M6.1地震前後15天電離層電漿變化情形。最上圖為地震擾動指數(Dst index)，藍色直線為地震發生日期與時間。第二張圖到第四張圖中，紅色線代表當天電離層電漿濃度觀測資料，黑色線為當天前15天所建立之電漿濃度上界與下界，灰色線則為前15天電漿中位數值。紅色與藍色區塊分別代表當天電離層電漿濃度高於上界與低於下界之電漿濃度差值。圖中紅色點與藍色點則代表電離層正異常天與負異常天判定結果。

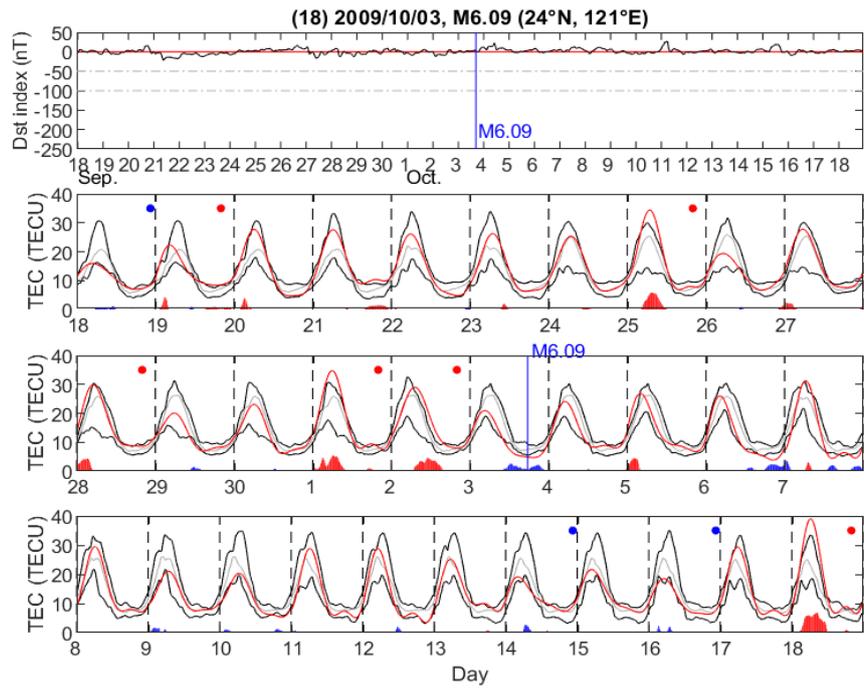


圖2、2009年10月3日M6.09地震前後15天電離層電漿變化情形。圖片格式與圖1相同。

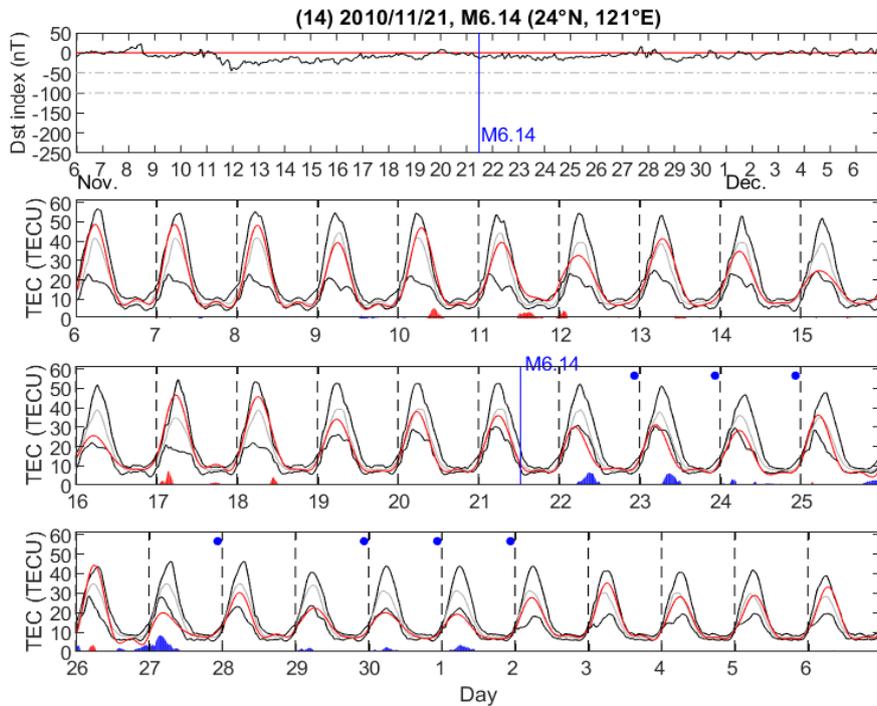


圖3、2010年11月21日M6.14地震前後15天電離層電漿變化情形。圖片格式與圖1相同。

四、 研究方法與進行步驟

1. 從 2022 年往前尋找地震規模大於等於 5 以上的地震，並利用中研究 AutoBATS 網頁提供之震源機制獲取各地震之斷層形態(包含斷層走向 strike、傾角 dip、滑移角 rake 與 PBT 軸)，以及蒐集震央附近之地面氣象站資訊。
2. 分析不同地震之斷層形態、電離層異常特性以及氣象參數之間關係。
3. 利用以上資訊計算地震前的電離層異常值，嘗試尋找其與地震的關係。

五、 具體成果

地震列表重建

在進行2022年地震列表建立時，發現今年(2023年3)搜尋到的地震結果與去年(2022年)的結果不太一致，推測可能是因為氣象署地震資料庫中的地震規模經過修正所致。比如說，原本規模5.0的地震下修至4.9，或原本規模4.9的地震上修至5.0，這都會使得研究中所使用的地震列表不同。因此，本計畫研究所使用的地震列表以2023年3月31日於氣象署網站搜尋結果為準，時間涵蓋1994年到2022年，經度與緯度限制在119°E-124°E與20°N-26°N之間，共找到規模大於等於5.0地震954筆。進一步將地震發生時間轉為國際標準時間(Universal Time, UT)之後，再將同一天發生的地震取規模最大的地震做為代表，整理後剩下765筆地震。接下來將這些地震沒有震源機制解的個案排除後，最後本計畫統計分析的地震數為613筆。圖4為613筆地震震央分布圖，並根據不同地震深度區分為極淺層地震(深度小於30公里，有334筆)、淺層地震(深度介於30公里與70公里之間，有147筆)以及中深層地震(深度大於等於70公里，有132筆)三種類型。

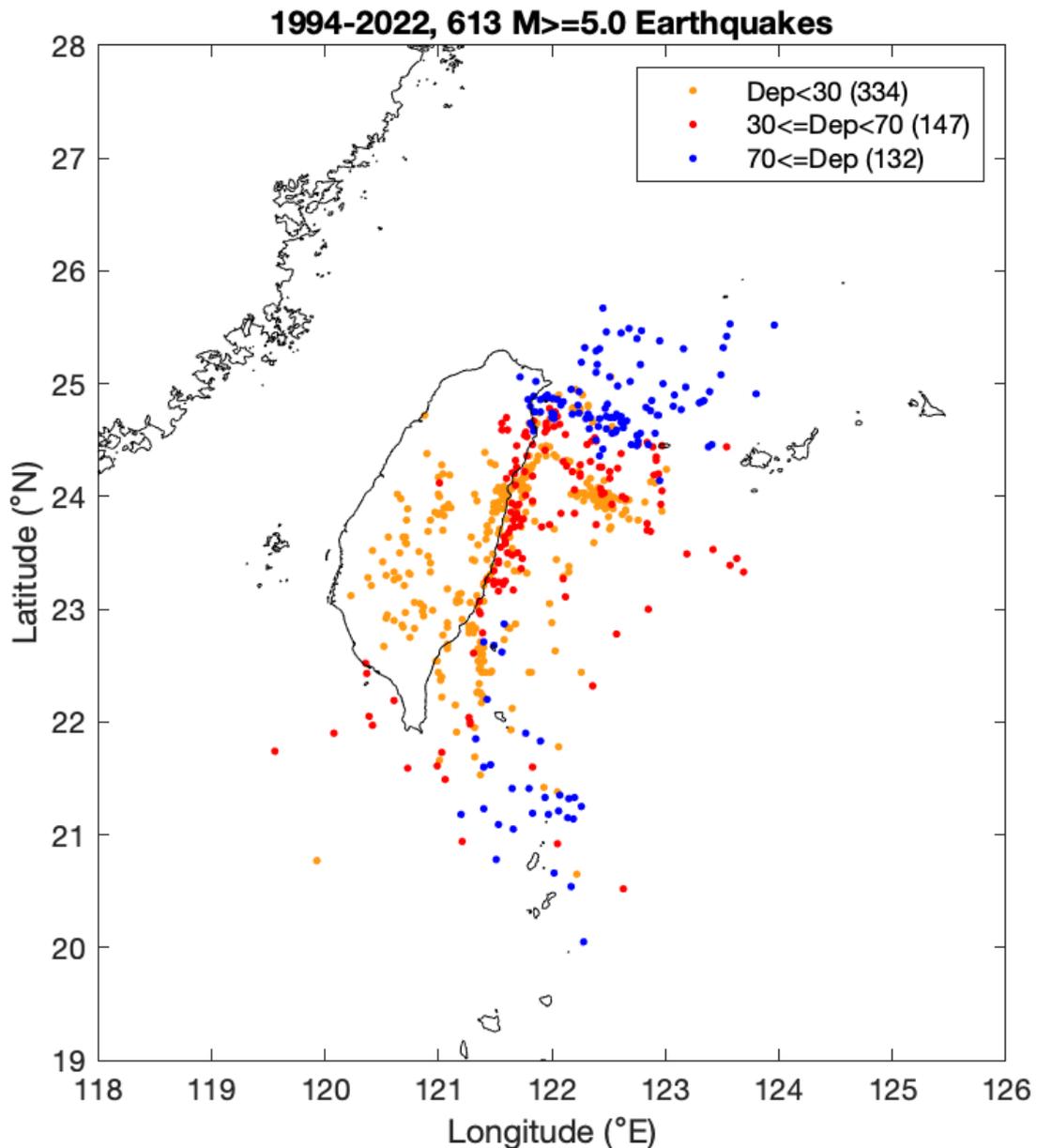


圖4、1994年到2022年間613筆地震規模大於等於5.0之地震震央分布。橘色點為334筆震央深度小於30公里的地震；紅色點為147筆震央深度介於30-70公里間的地震；藍色點為132筆震央深度大於70公里的地震。

地震斷層類型分類

為了研究不同電離層地震前兆的類型(正異常、負異常、正常)是否與地震型態(正斷層、逆斷層、平移斷層)有關，因此針對研究中所列出的地震，利用各個地震的震源機制解進行地震類型分類。本研究所使用的震源機制資料來自於中研究AutoBATS。地震斷層類型採用Zoback(1982)的分類方式(表1)，利用震源機制P、B、與T軸的值，將斷層分為正斷層(NF)、正平移斷層(NS)、平移斷層(SS)、逆平移斷層(TS)、逆斷層(TF)與不確定(U)，共6類型。以三角座標方式呈現如圖5所示。由結

果來看，研究期間臺灣地區地震斷層類型以逆斷層為主(45.4%)，但也有很多斷層為不確定型(20.2%)，第三多的則是平移斷層(13.5%)，接下來依序為正斷層(12.7%)、逆平移斷層(5.2%)以及正平移斷層(2.9%)。

表1、地震斷層類型分類表。P為最大壓縮軸、T為最大伸張軸、B為中軸(=PxT)。下表範圍外的地震則定義為不確定類型(U)。(Zoback, 1982)

TABLE 3. Stress Regime Characterization (and Method of Determining S_{Hmax} Azimuth) Based on Plunge (pl) of P , B , and T Axes or S_1 , S_2 , and S_3 Axes

Plunge of Axes			Regime	S_{Hmax} Azimuth ^a
P/S_1	B/S_2	T/S_3		
$pl \geq 52^\circ$		$pl \leq 35^\circ$	NF	azimuth of B axis
$40^\circ \leq pl < 52^\circ$		$pl \leq 20^\circ$	NS	azimuth of T axis + 90°
$pl < 40^\circ$	$pl \geq 45^\circ$	$pl \leq 20^\circ$	SS	azimuth of T axis + 90°
$pl \leq 20^\circ$	$pl \geq 45^\circ$	$pl < 40^\circ$	SS	azimuth of P axis
$pl \leq 20^\circ$		$40^\circ \leq pl < 52^\circ$	TS	azimuth of P axis
$pl \leq 35^\circ$		$pl \geq 52^\circ$	TF	azimuth of P axis

1994-2022, Taiwan zone, $M > 5.0$ earthquake, total 613 cases

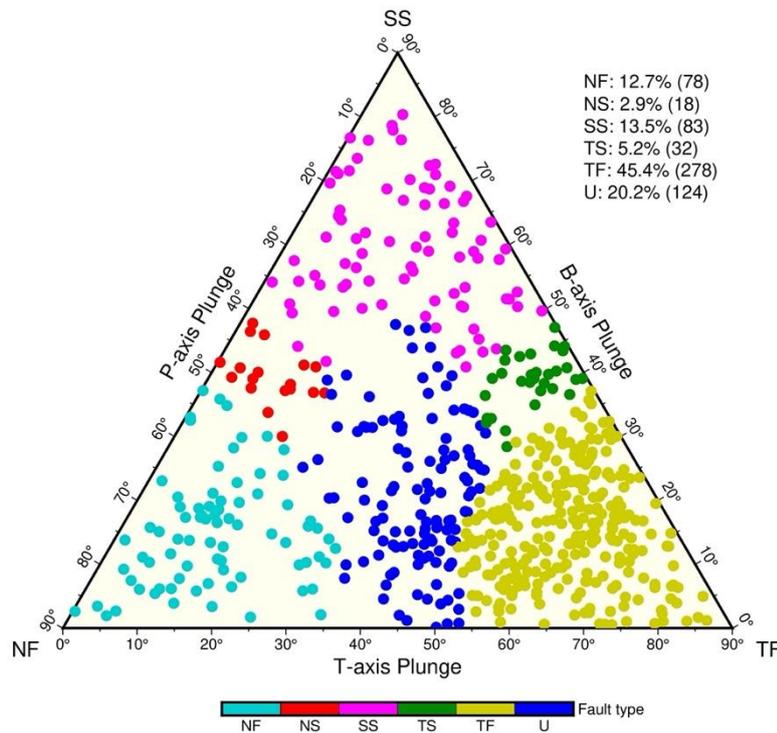


圖5、研究期間不同地震斷層類型三角分布圖。由多到少依序為逆斷層(TF, 淺綠色)、不確定型(U, 藍色)、平移斷層(SS, 粉紅色)、正斷層(NF, 紅色)、逆平移斷層(TS, 綠色)與正平移斷層(NS, 淺藍色)。

地面氣象站資料整理

地震前造成電離層電漿異常的電場，除了可能受到不同斷層類型的影響之外，地面大氣狀態也會影響地表電場是否能夠往高空傳遞到電離層，這或許是為什麼地震前電離層異常前兆只佔全體地震約20%-30%的原因。為了要回答這個問題，本研究蒐集了1994年到2022年間613筆規模大於等於5.0的地震前30天，距震央最近的地面氣象站資料，包含氣溫、相對濕度、降雨量與氣壓。資料來源為大氣水文資料庫中約660個氣象站(圖6)，資料解析度為1小時。首先，因為資料時間為當地時間(Local Time, LT)，所以將其轉換成UT後，再針對613筆地震震央位置，利用大圓距離尋找最近的4個氣象測站，在刪除地震前30天內無氣象觀測資料(NaN)的地震事件之後，本研究最後統計分析地震數為599筆。

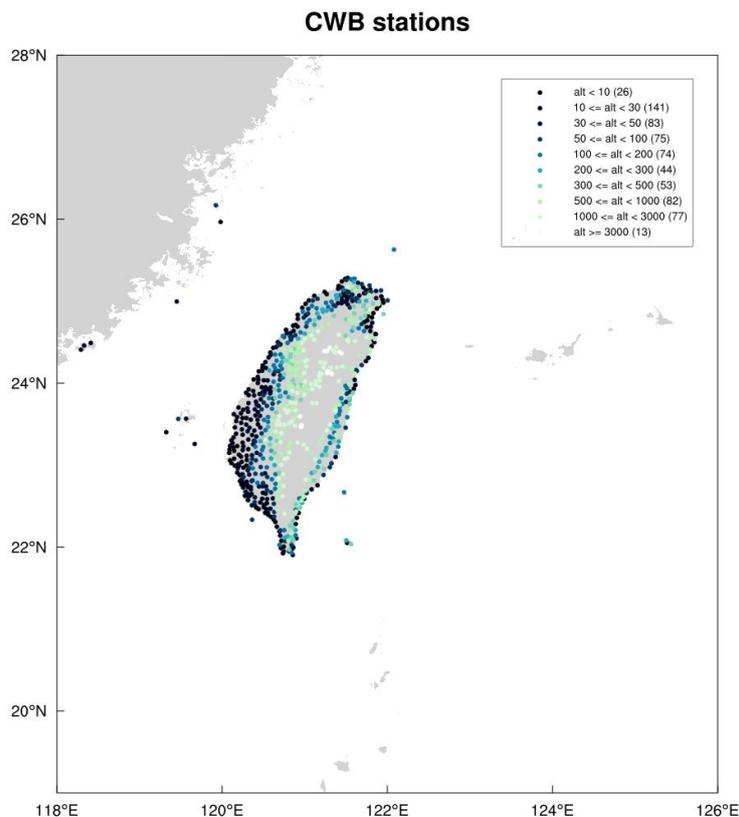


圖6、大氣水文資料庫氣象站空間分布圖。不同顏色代表不同測站海平面高度。(資料來源：https://e-service.cwb.gov.tw/wdps/obs/state.htm#existing_station)

個案探討-2010/11/21 M6.14

以2010年11月21日M6.1地震為例(圖7)，圖8為前30天氣象站所觀測到的氣象參數，以氣壓場來說在地震前3天到地震當天(11/18-11/21)的氣壓值逐漸降低；氣溫變化則在地震前第17天(11/04)到第6天(11/05)間較低或是沒有明顯日變化；相對濕度在地震前第14天(11/07)有明顯降低，在地震前第9天(11/12)又開始回復；降雨量則在地震前第17天到第13天(11/04-11/08)以及地震前第9天到第3天(11/12-11/18)期間有發生降雨。

過去地震前電離層前兆統計研究發現，地震規模越大地震前出現電離層異常的機率越高，可是分析2010年11月21日M6.1地震前電離層資料來看(圖3)，發現地震前15天都沒有出現電離層TEC異常，這是否因為地震前氣壓、降雨等大氣狀態的改變而使得地表電場無法有效傳遞到電離層中，無法形成電離層異常?是不是所有地震都有相似的情形發生?以及兩者資料(氣象站參數與電離層TEC異常)之間是否存在相互關係?接下來將進行統計分析。

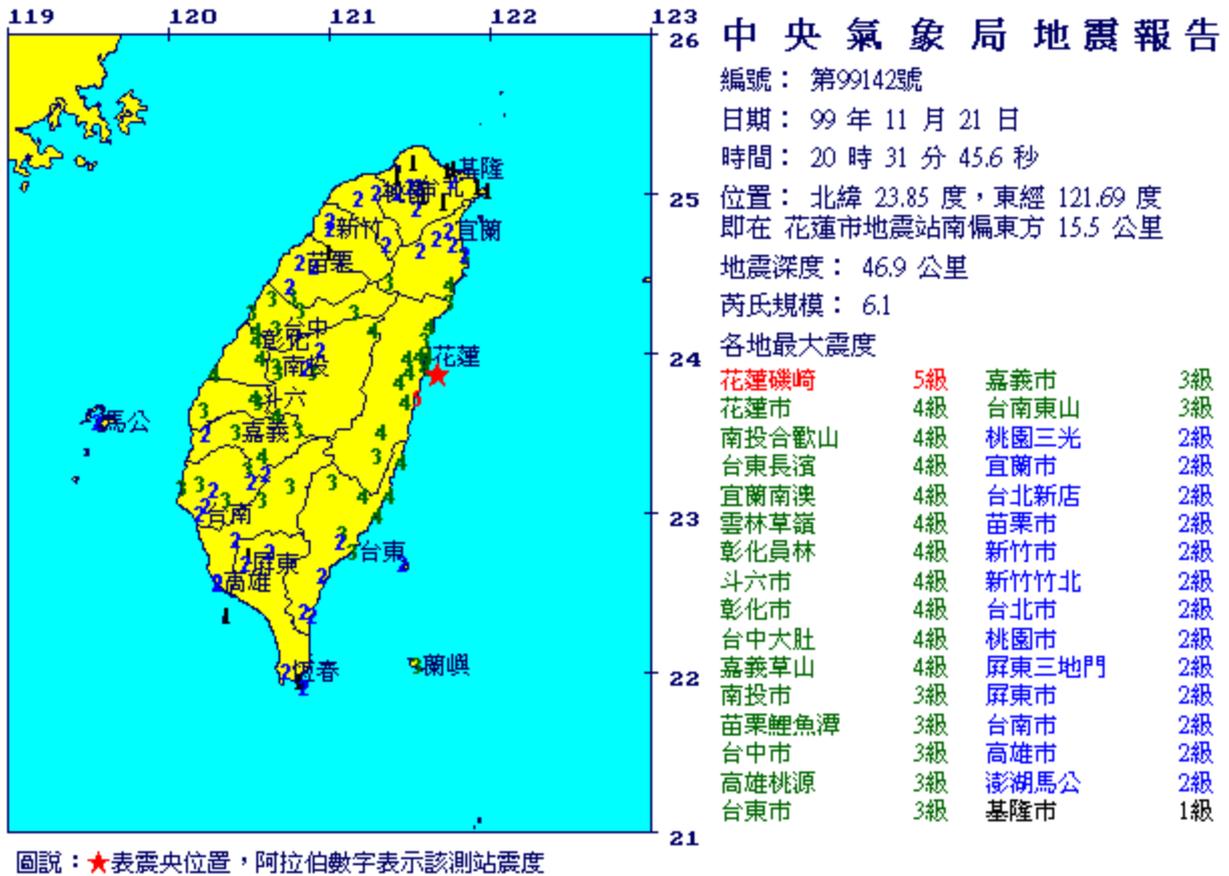


圖 7、2010 年 11 月 21 日 M6.1 地震報告。此地震為逆平移斷層(TS)地震類型。

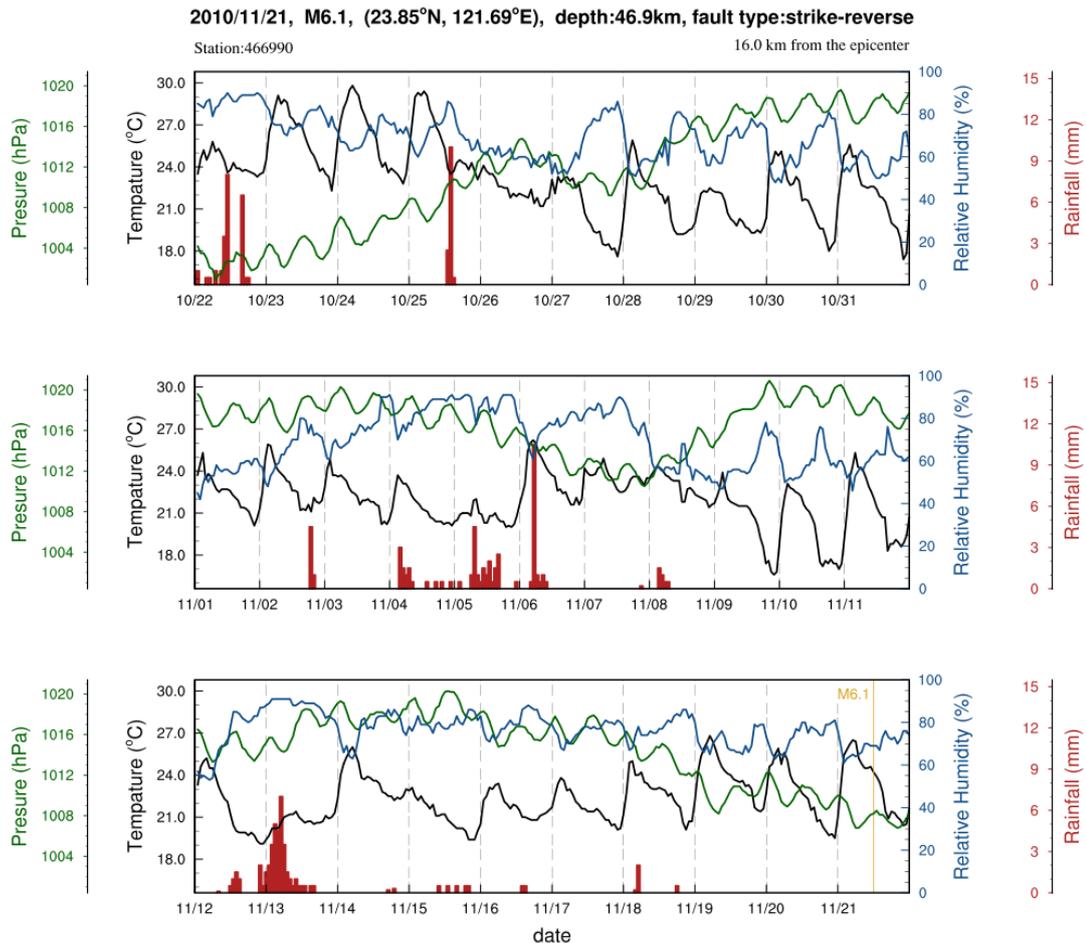


圖 8、2010 年 11 月 21 日 M6.14 地震前 30 天各氣象參數的變化情形。此氣象站距離震央 16.0 公里。綠色線是氣壓、黑色線是氣溫、藍色線是相對濕度、紅色長條為時雨量。

統計分析

分析臺灣地區1994年到2022年間的地震前後15天電離層異常特性，可以得到如圖9的結果。在地震規模大於等於5以上的599筆地震事件中，電離層異常皆以正異常為主，而當地震規模越來越大時，可以看到電離層負異常開始變得明顯，並集中在地震前5天到地震前1天之間。若將不同地震斷層類型加以區分，針對規模5以上的地震電離層異常可得到圖10的分析結果直接由結論來看，逆斷層類型(TF)的地震最多，其電離層異常主要為正異常為主，而不確定斷層類型(U)的結果也是以電離層正異常為主，這兩種斷層類型的地震因為數量很多，因此主導了圖九中正異常為主的結果。另外一方面，由圖10可以知道，正斷層類型(NF)、正平移斷層類型(NS)與平移斷層類型(SS)的地震前有明顯電離層負異常出現的特性。當地震規模逐漸增加時(圖11與圖12)，可以看到正斷層類型(NF)與平移斷層類型(SS)的地震前電離層負異常越來越明顯，而逆斷層類型(TF)與不確定類型(U)的地震前也開始出現電離層負異常，並且集中在地震前8到地震當天。上述可以說明圖9中地震規模越大，電離層負異常開始逐漸出現的情形。

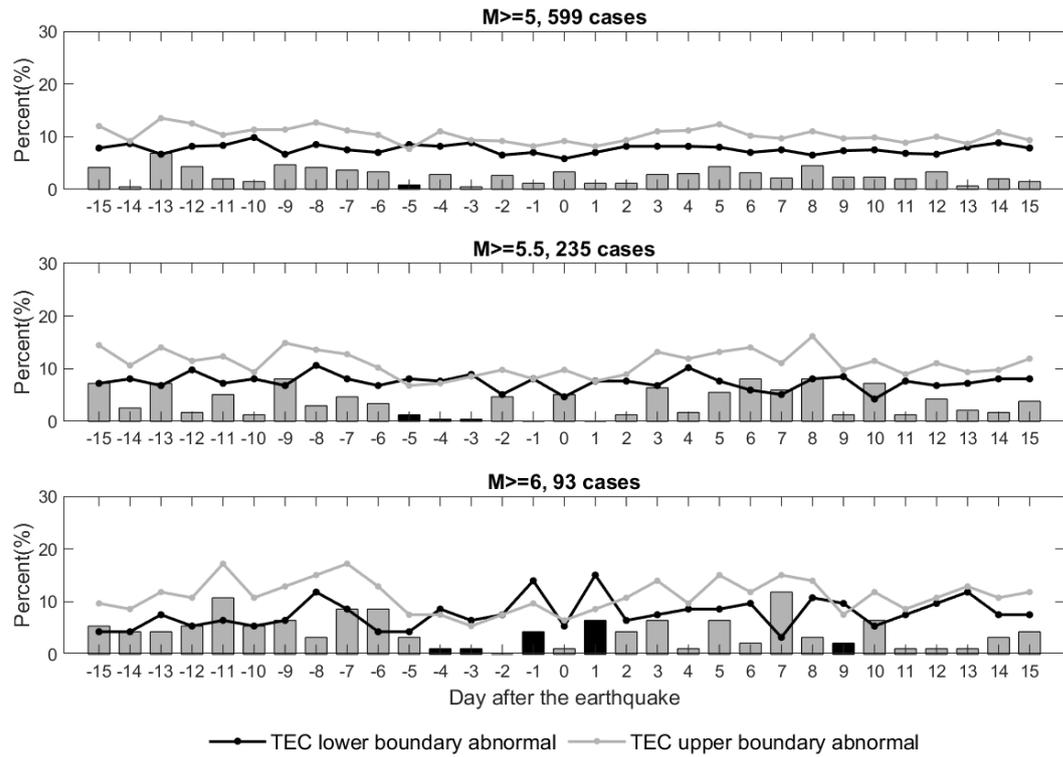


圖 9、不同地震規模大小地震前後 15 天電離層異常變化。灰色線為電離層正異常，黑色線為電離層負異常，兩者相減的差值若正異常較多則以灰色長條表示，反之則以黑色長條表示。

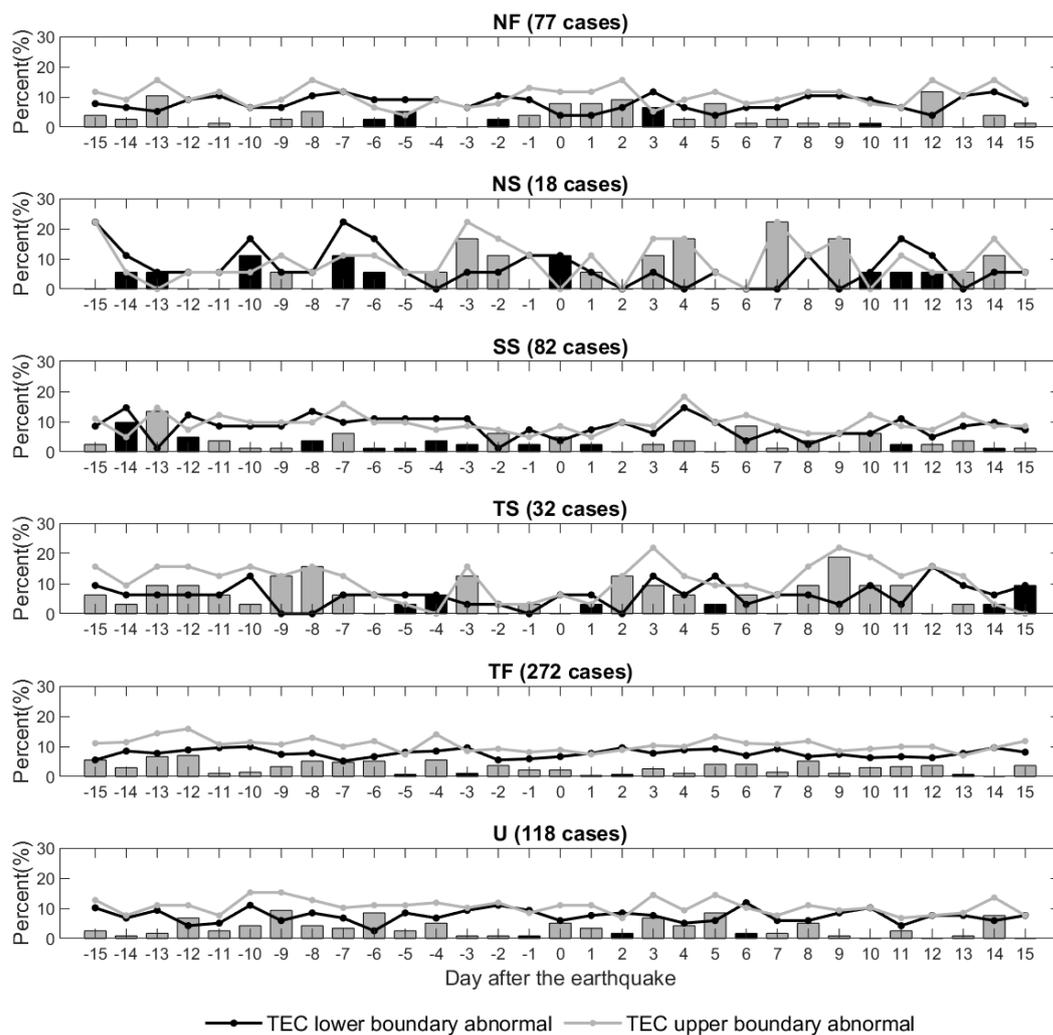


圖 10、規模 5 以上不同地震斷層類型之電離層異常變化。格式與圖 9 相同，地震類型分類標準與代號可參考表 1 與圖 5。

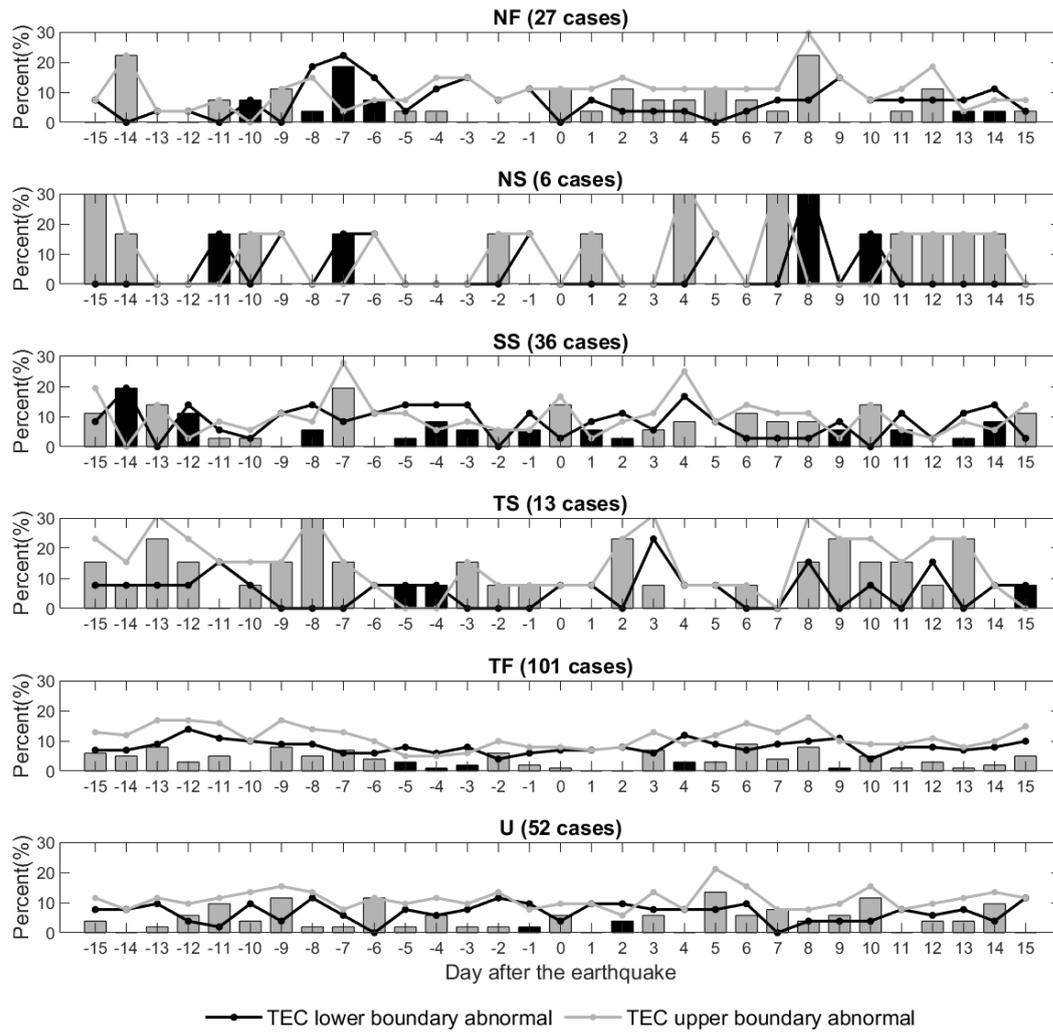


圖 11、規模 5.5 以上不同地震斷層類型之電離層異常變化。格式與圖 10 相同。

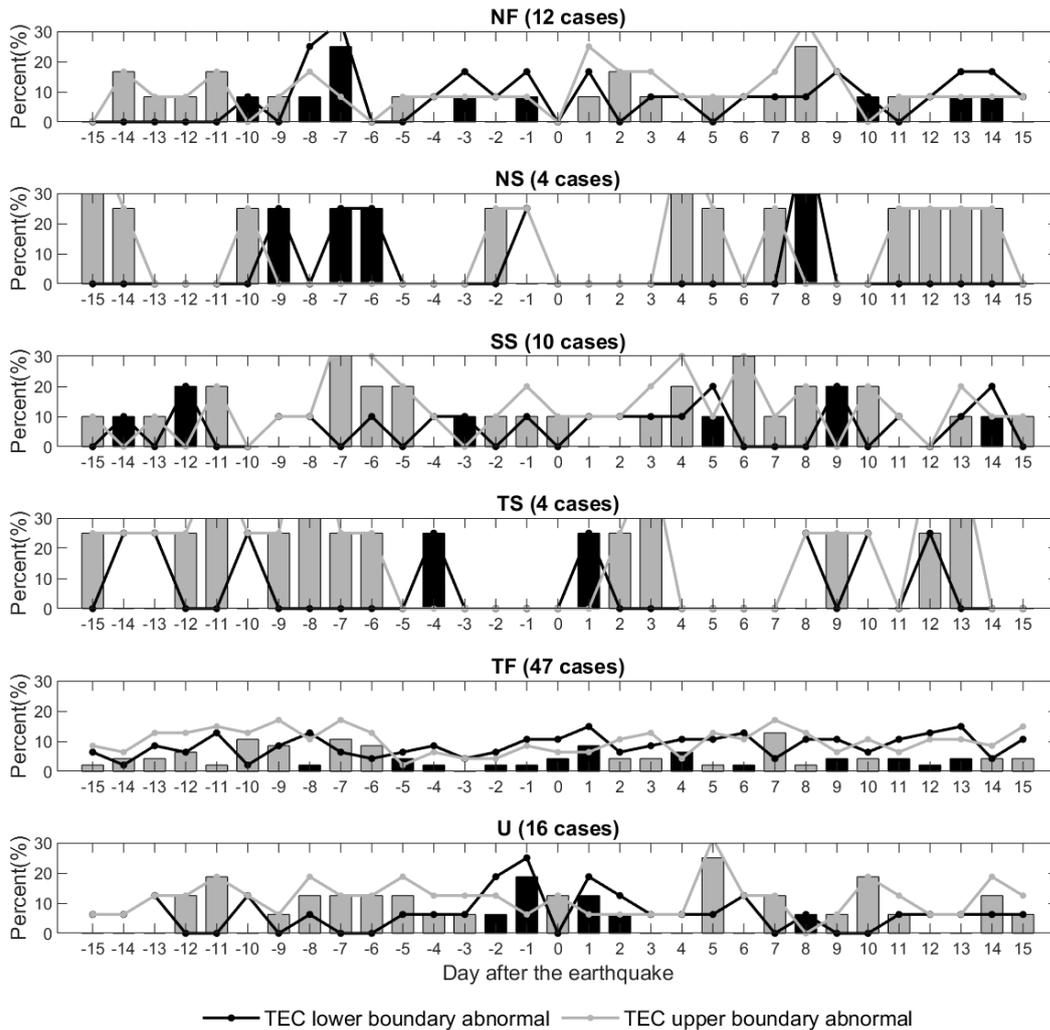


圖 12、規模 6 以上不同地震斷層類型之電離層異常變化。格式與圖 10 相同。

根據電離層物理理論基礎，造成電離層電漿變化的原因可能來自於(1)磁場改變；(2)電場改變；(3)重力波動。地震電離層異常以時間尺度來看，通常在數十分鐘到數天之間，這段期間如果沒有太陽磁暴發生的話，磁場對電離層的電漿變化可以忽略。而重力波動若是沒有足夠的能量(例如颱風、火山噴發、海嘯等)，一般很難傳遞到電離層去改變電漿結構。地震在孕震過程時通常沒有劇烈的地表活動，因此很難引發大規模的重力波影響電離層電漿變化。最後最有可能的則是電場作用，這也是目前主流認為地震前電離層電漿發生異常的可能物理機制。如同簡介章節說明的那樣，在地震孕震期間，因為地層間錯動的關係因而產生電場，當這個電場傳遞到地表時，有機會可以再往高空的電離層傳遞並影響電漿結構。根據不同方向的電場，會引起不同形態的電離層異常(東向電場對應到正異常，西向電場對應到負異常)，但無論如何必須這個地表電場能夠傳到大氣之中才會成立。因此，相較於氣壓、氣溫與相對濕度來說，降雨對電離層異常的影響較為直觀，這是因為降雨會直接影響地表電場的發生與傳播。為了探討降雨可能對電離層異常造成影響，因此針對有無降雨進行電離層異常的統計分析。

圖13為地震前後15天內降雨事件與電離層異常事件數目比較情況，超過降雨門檻0.1 mm則視為有效地震。因為無法得知降雨影響的地表電場方向，因此這裡的電離層異常為正負異常一起計算，只要當正異常或是負異常或是同時發生，則定義為異常天。整體來看，不管地震規模大小，大約有一半左右的地震在地震發生前15天內有發生降雨。隨著地震規模的增加，地震前第8天有最少的降雨事件，而電離層異常則明顯最高，似乎說明降雨事件與電離層異常之間呈現相反的變化，當降雨發生較少時，電離層異常較明顯。換句話說，降雨的發生可能導致電離層異常的消失，或是地表電場受到降雨的影響而無法傳遞到電離層。然而，其他天數則沒有如上述明顯的反相變化，因此上述的推論有待驗證。接下來，若將降雨門檻值增加100倍到10 mm，結果如圖14所示，降雨事件與電離層事件數目相近，在地震前第8天附近降雨事件與電離層異常事件數目同樣有反相的變化，並隨著地震規模的增加而更加顯著。

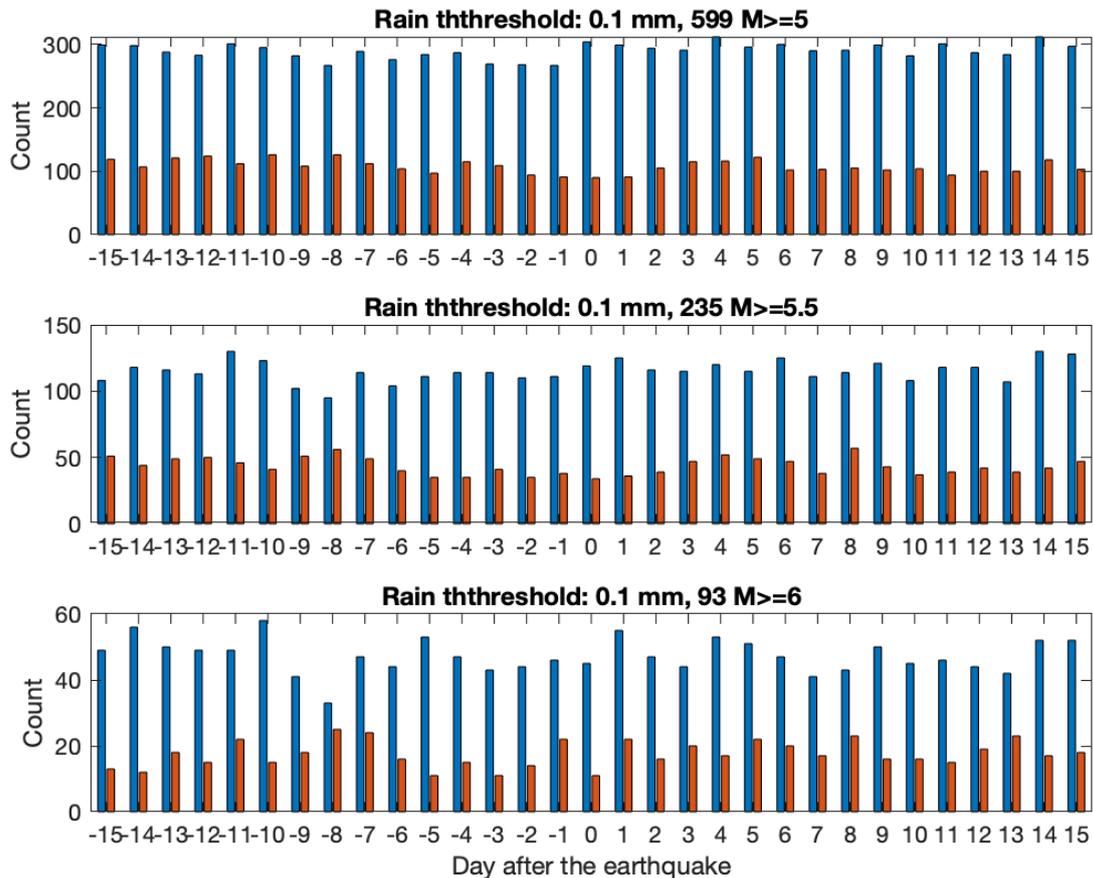


圖13、降雨門檻為0.1 mm下，不同規模地震前後15天內降雨事件與電離層異常事件筆數。藍色長條為降雨事件數目，紅色長條為電離層異常事件數目。

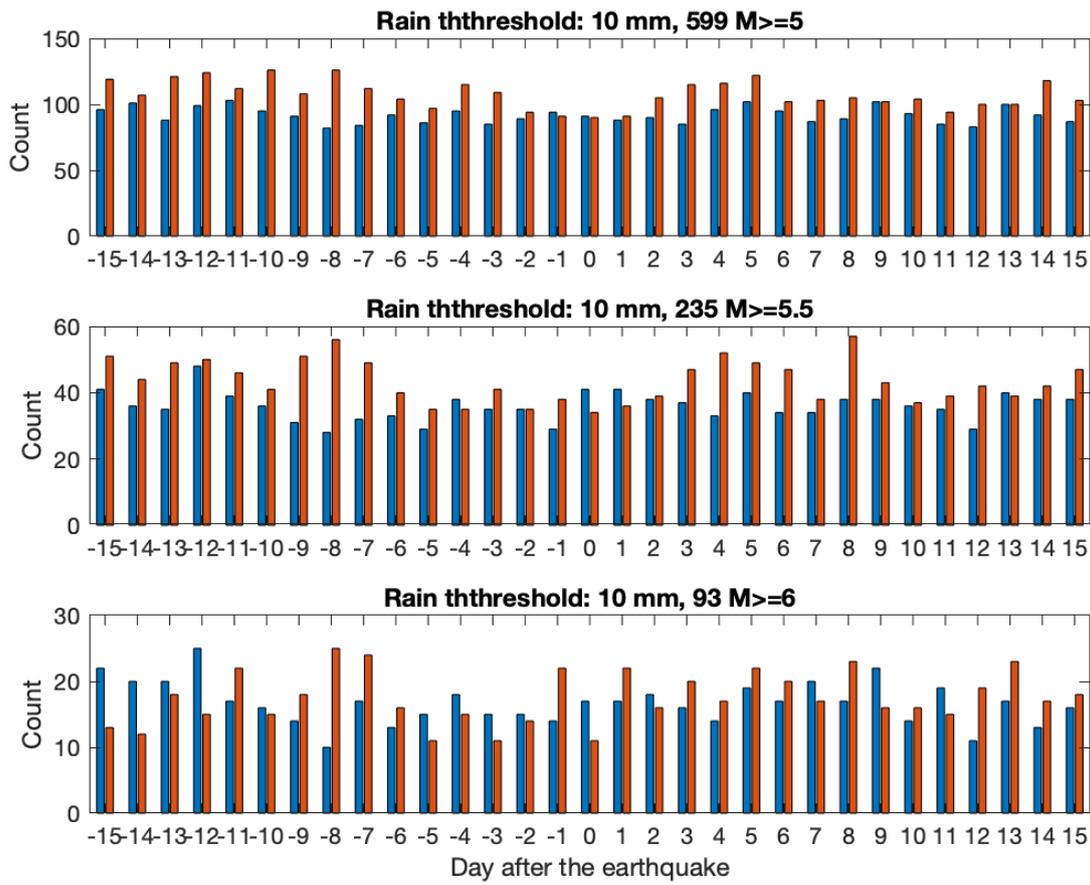


圖14、降雨門檻為10 mm下，不同規模地震前後15天內降雨事件與電離層異常事件數目。格式與圖13相同。

電離層異常累積值

因為電離層電漿異常可正可負，為了了解地震前電離層異常的發生與否，以及評估其與地震發生之間的關係，因此只要發生電離層異常則視為1，兩者皆無則視為0。利用1994年到2022年間599筆規模大於等於5以上的地震進行分析，可以得到地震前15天內出現電離層異常的機率(如圖15紅色點線)。除此之外，針對規模5.5以上與6.0以上的地震，同樣可以計算前15天內電離層異常發生機率。利用上述29年統計結果，我們可以計算電離層異常累積值(abnormal cumulation, 接下來稱AC值)，並進一步評估不同規模地震的AC值分布。圖15為AC值計算示意圖，0為地震當天，我們有前15天內的電離層異常機率值(紅色點線)，以及前15天內電離層異常與否的值，兩者相乘之後加總即為AC值，可用下式表示。

$$AC值 = 電離層異常訊號 \times 電離層異常機率 \quad (1)$$

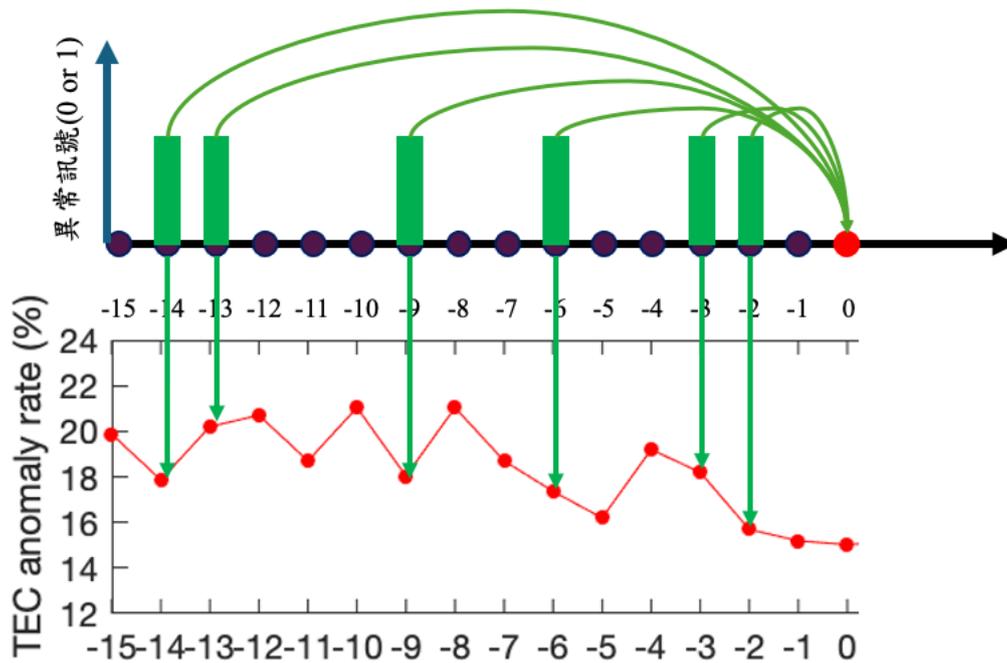


圖15、電離層異常累積值計算說明示意圖。綠色長條代表異常發生(正異常或負異常皆同)，紅色點線為1994年到2022年間異常發生的比例。電離層異常累積值為前15天兩者相乘加總的數值。

圖16為不同規模地震發生前AC值的統計分布，其中第1列為不考慮是否降雨時的結果，可以看到不管地震規模大或小，平均AC值介在52.0~53.9之間，標準差值為32.8~36.6之間。在假設降雨會影響電離層異常的前提下，將降雨視為電離層異常發生，則可得到(1)式中新的電離層異常機率。考慮不同門檻降雨事件，則可得到不同降雨門檻下的電離層異常機率，最後可得到第2列到第6列的統計分布結果。在降雨門檻值小的情況之下，可以看到AC值有增加的趨勢，而隨著降雨門檻的增加，其分布逐漸接近第1列不考慮降雨與否的分布。若以地震規模來看，整體上隨著地震規模增加，平均AC值有增加的趨勢並且標準差值有降低的趨勢。

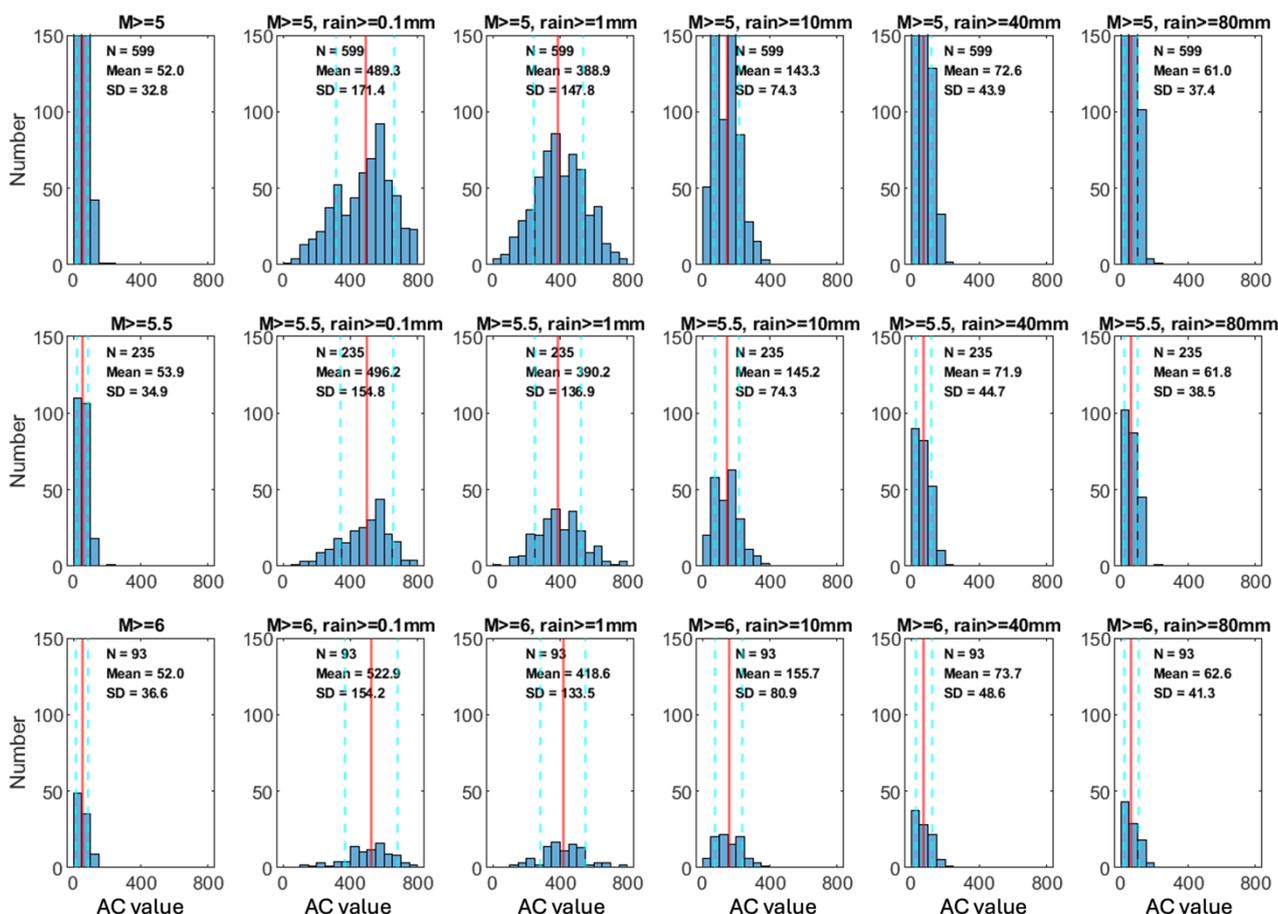


圖16、電離層異常累積值統計分布。最上排為599筆 $M \geq 5.0$ 地震統計結果，中間排為235筆 $M \geq 5.5$ 地震，最下排為93筆 $M \geq 6.0$ 地震。第1列為不考慮降雨與否結果，第2列到第6列分別針對不同降雨門檻(0.1~80 mm)的統計結果。紅色線為平均值，淺藍色虛線為1倍標準差範圍。橫座標為AC值，縱座標為地震個數。

AC值是否能夠用來提供地震發生機率的可能性，因此針對2022年9月18日M6.8地震前後進行AC值的計算。圖17為8月1日到9月30日兩個月期間AC值的日變化，隨著時間越來越接近地震，AC值從8月8日開始有逐漸增加的趨勢，並在 $M \geq 5.0$ 的分析結果中9月14日有最高的AC值、 $M \geq 5.5$ 的分析結果同樣在9月14日有最高的AC值，而 $M \geq 6.0$ 的分析結果則顯示9月12日有最高的AC值。在9月19日M6.0地震發生之後，AC值開始降低。在AC值上升與下降的期間，在8月22日、9月14日與9月17日發生了M5.9、M5.3與M6.6地震，似乎與AC值的增加有某種程度的相關性，但此為單一事件因此有需要進一步分析其他地震事件，甚至評估今年(2023)的地震前後AC值是否有明顯變化。利用上述的關係，將來可測試最佳AC門檻值，做為地震發生機率的可能性。

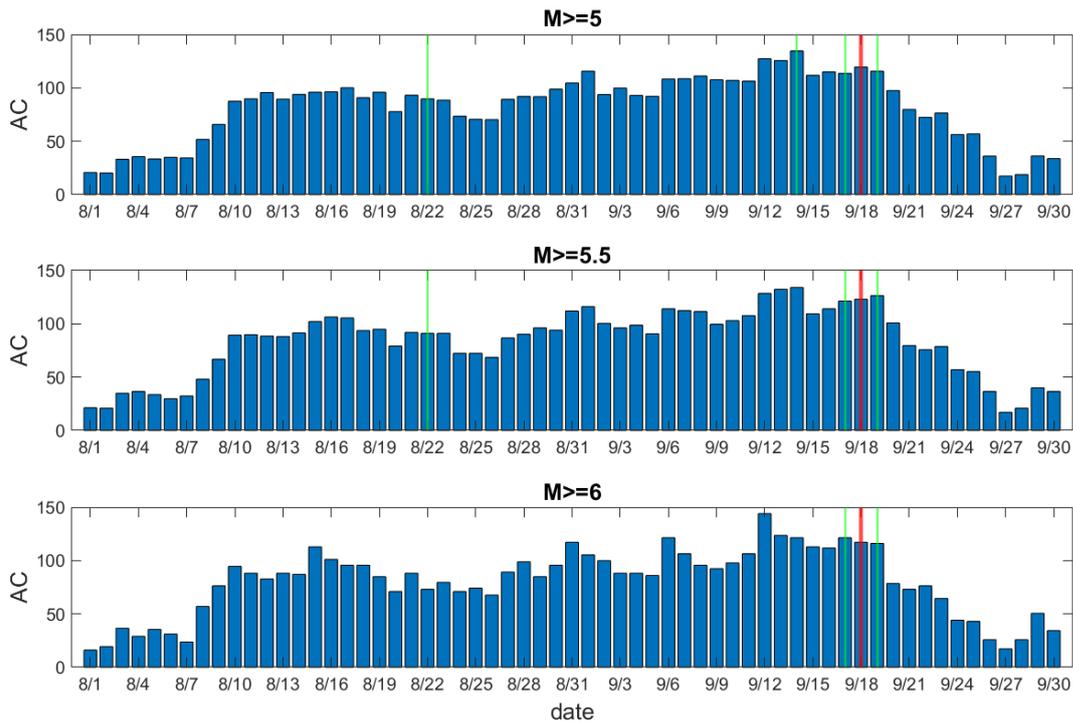


圖17、2022年8月1日到9月30日期間AC值的變化。三排分別代表不同電離層異常機率計算結果。紅線代表9月18日發生的M6.8地震，綠色分別代表8月22日M5.9地震、9月14日M5.3地震、9月17日M6.6地震與9月19日M6.0地震。

六、 結論與建議

本研究針對1994年到2022年間(共29年)所發生599筆規模大於等於5.0的地震，研究成果主要可分為以下三個部分：

(1) 不同斷層類型地震與電離層異常的關係

根據地震震源機制解進行地震類型分類，分成正斷層、逆斷層、平移斷層、正平移斷層、逆平移斷層與不確定性斷層6種類型，其中以逆斷層類型的地震最多，正平移斷層類型的地震最少。利用全體地震進行電離層電漿濃度異常統計分析，研究顯示，針對規模大於等於5.0的地震，地震前以正異常(濃度增加)為主。若進一步將地震類型分類，逆斷層類型地震前電離層以正異常為主，而正斷層、平移斷層與正平移斷層類型地震前電離層以負異常(濃度減少)為主。隨著地震規模逐漸增加，逆斷層類型地震於地震前開始出現電離層負異常現象。

(2) 大氣參數對於電離層異常的影響

在考慮不同降雨門檻對電離層異常的影響統計研究中發現，地震發生前第8天的降雨事件數最少，而此時電離層異常的數目則最多，兩者呈現反相的變化，並且隨著地震規模的增加，這種反相變化的情形變得更加顯著，但並不是每一天都是如此，有待後續更詳細的研究。

(3) 電離層異常參數化計算

最後，本研究利用上述的研究成果，計算電離層異常累積值(AC值)，嘗試尋找電離層異常與地震之間的關係。研究顯示，在不考慮降雨影響的情形下，地震規模大小對統計平均AC值的影響不大。在考慮降雨的影響下，地震規模越大，統計平均AC值有增加的趨勢。本研究最後以2022年9月18日M6.8臺東池上地震個案進行AC值的測試，發現在地震發生前AC值開始上升，並於9月12日達到最大值，在地震發生之後又逐漸下降至背景值，說明AC值對於預警地震的可能性。

七、 成果的價值與貢獻、落實應用情形

本研究可以提供由電離層異常累積值統計分析資料，以供地震電離層前兆預警的參考。

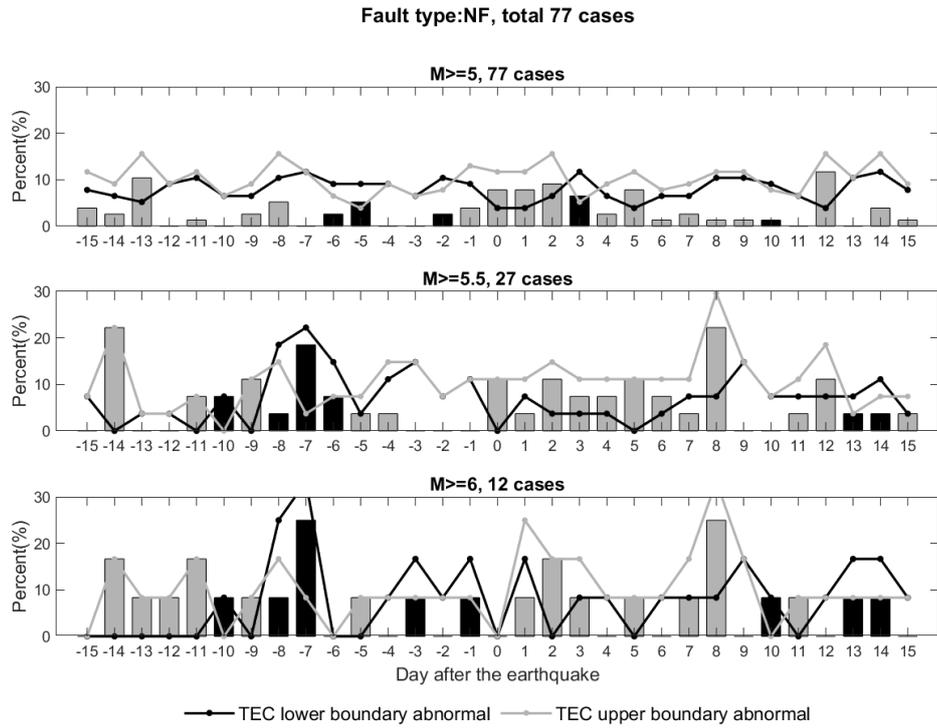
八、 參考文獻

Kelley, M. C. (1989), *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics and Electrodynamics*, Academic Press, Inc., San Diego, California.

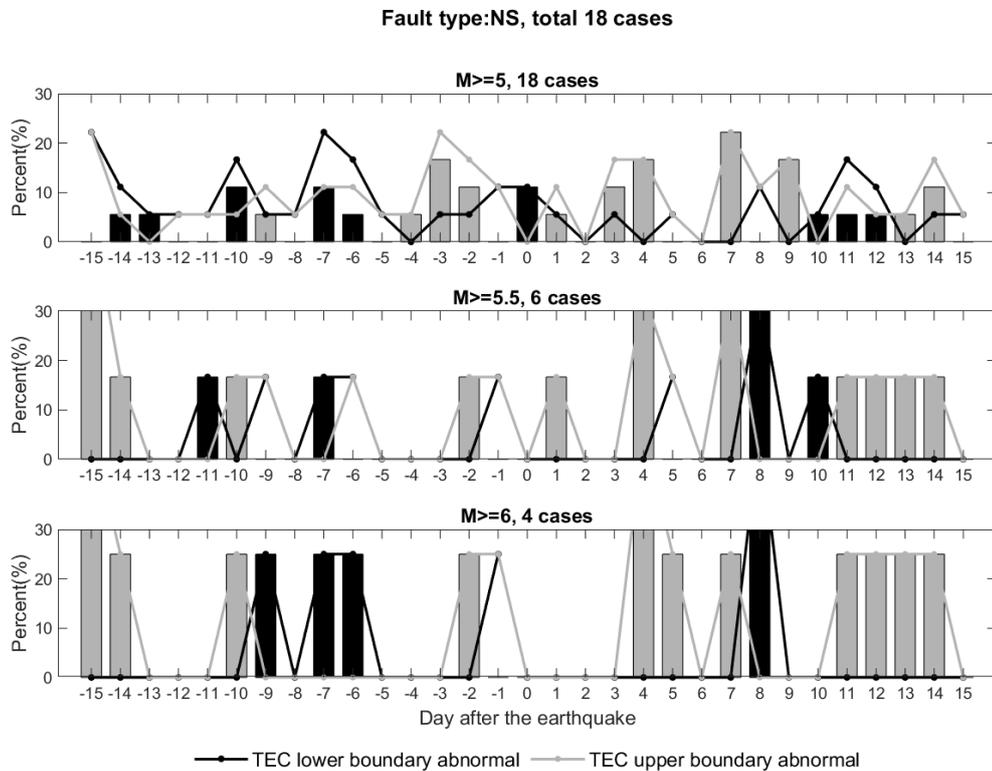
Girty, G. H. (2009), *Perilous Earth: Understanding Processes Behind Natural Disasters* (ver. 1.0), Department of Geological Sciences, San Diego State University.

Zoback M L. (1992), First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8): 11703-11728, DOI:10.1029/92JB00132.

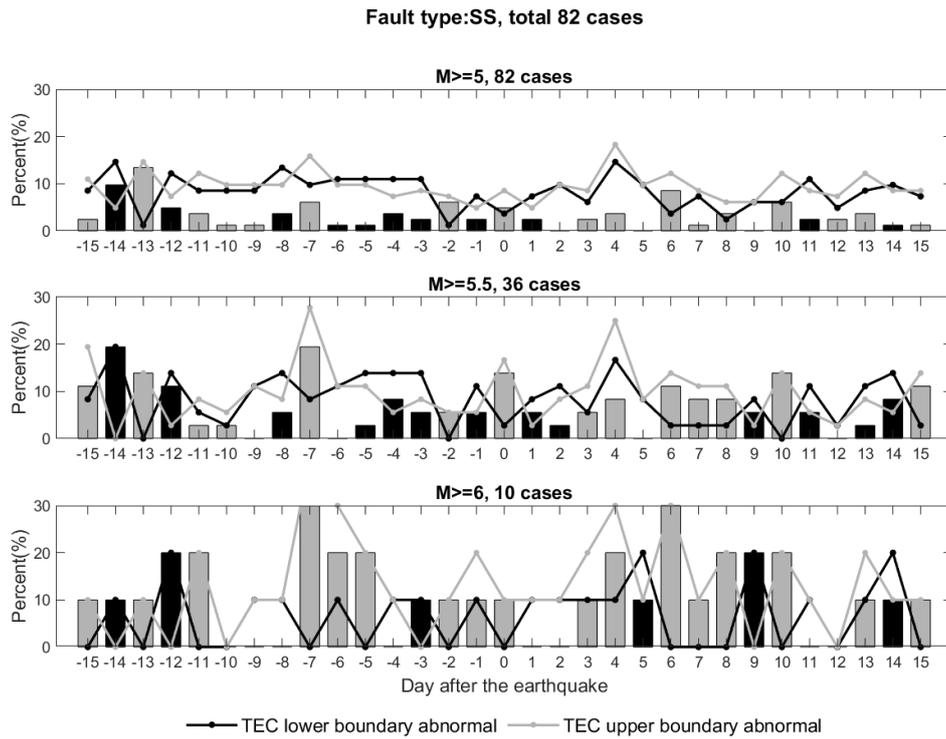
九、 附錄



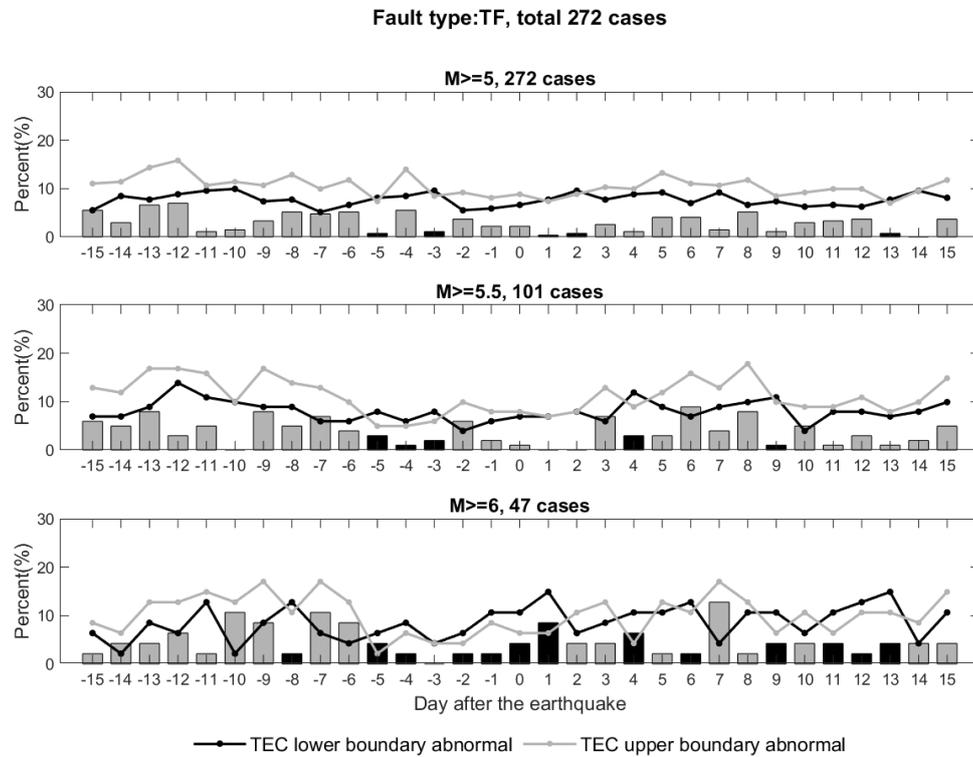
圖A1、不同規模正斷層類型地震前後15天內電離層異常統計結果。



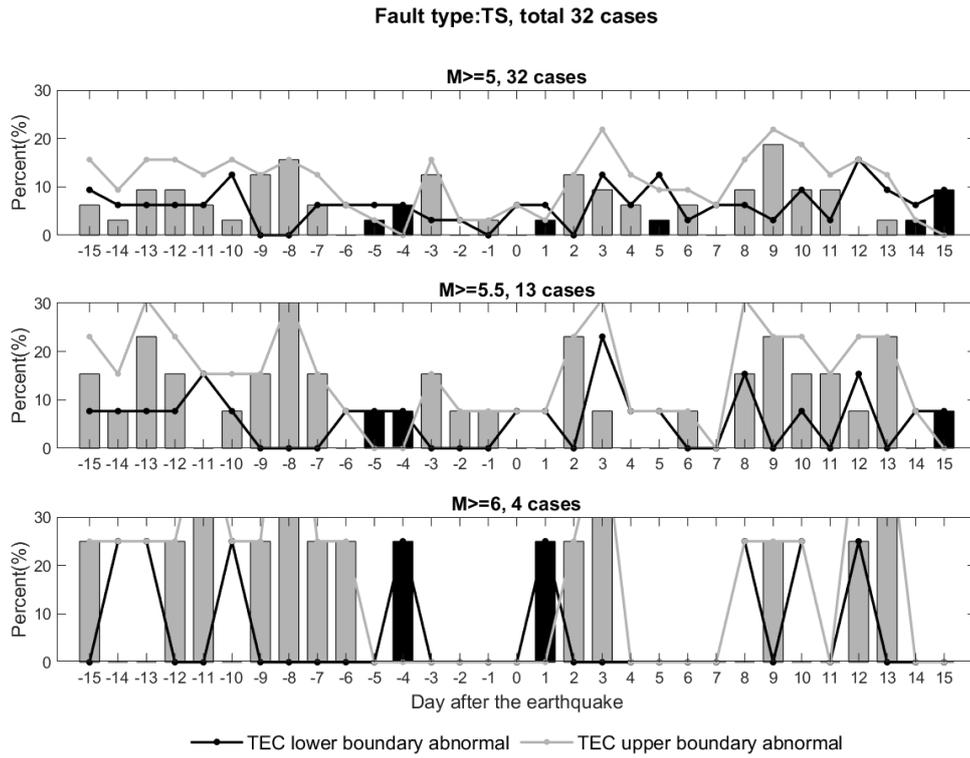
圖A2、不同規模正平移斷層類型地震前後15天內電離層異常統計結果。



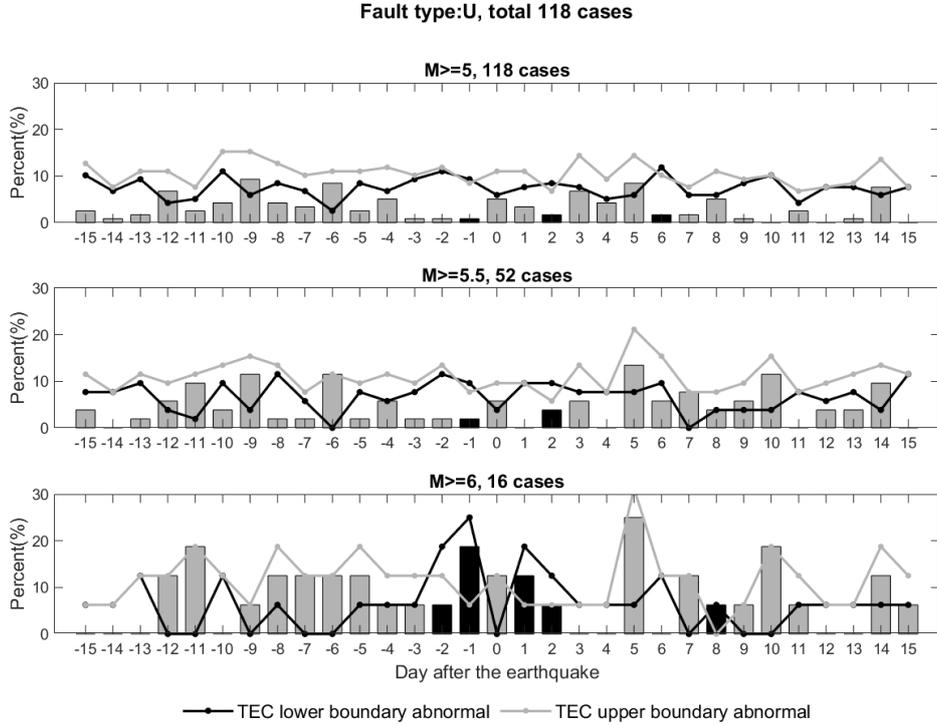
圖A3、不同規模平移斷層類型地震前後15天內電離層異常統計結果。



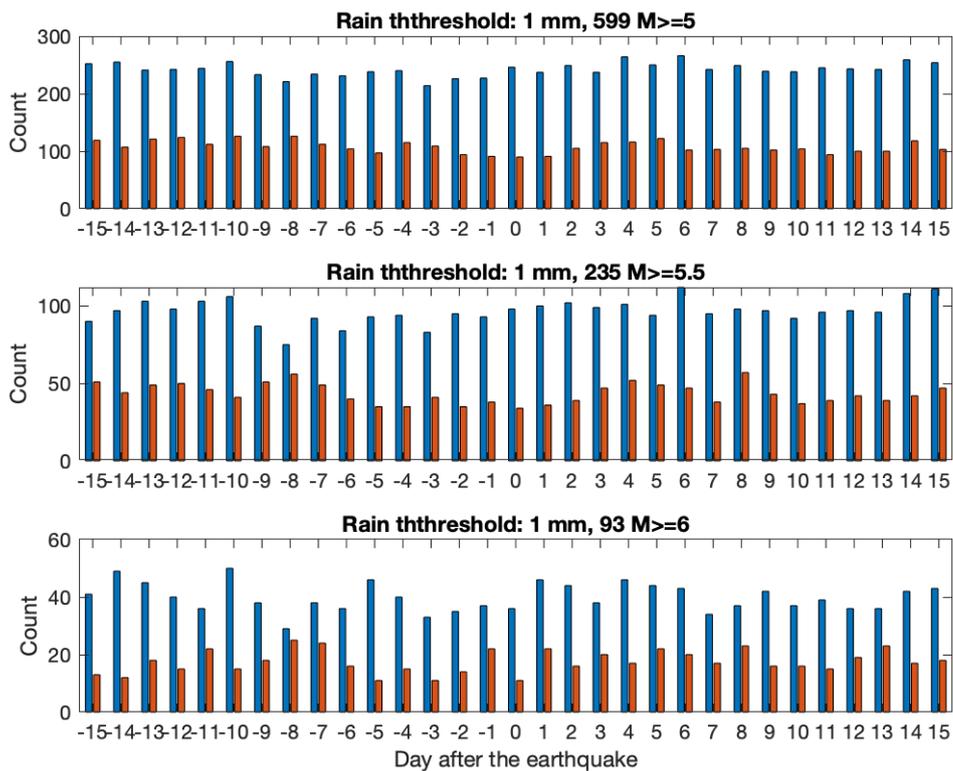
圖A4、不同規模逆斷層類型地震前後15天內電離層異常統計結果。



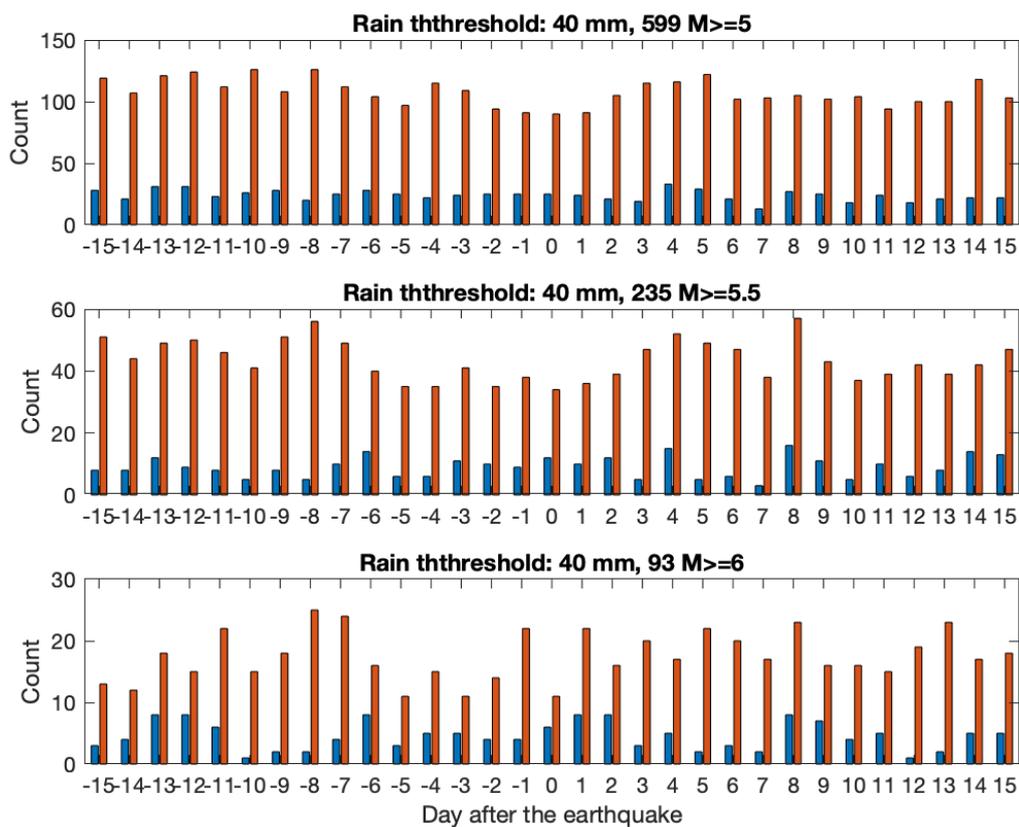
圖A5、不同規模逆平移斷層類型地震前後15天內電離層異常統計結果。



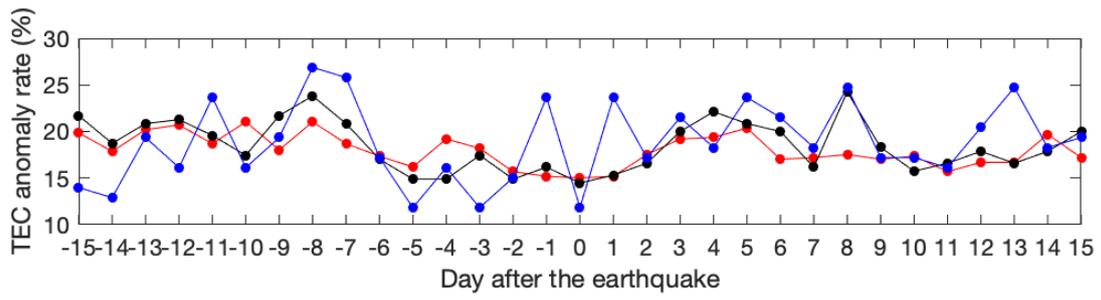
圖A6、不同規模不確定性類型地震前後15天內電離層異常統計結果。



圖A7、格式與圖13相同但降雨門檻為1 mm。



圖A8、格式與圖13相同但降雨門檻為40 mm。



圖A9、不同地震規模地震前後電離層發生異常統計機率。紅色線是599筆 $M \geq 5.0$ ，黑色線是235筆 $M \geq 5.5$ ，藍色線是93筆 $M \geq 6.0$ 。

