

臺灣地區 112 年中大型地震震源資訊之快速彙整與提供

子計畫一

中大規模地震震源破裂特性近即時分析暨 CWB24 地震紀錄之極性檢驗

李憲忠 莊雅婷 劉庭佑 林姿綺

中華民國地球物理學會

摘要

即時地震矩張量監測系統 (Real-time Moment Tensor System, RMT) 是一個能夠自動偵測臺灣地區的地震活動的系統。監測區域包括東經 119.2 度到東經 123.0 度、北緯 21.0 度到北緯 26.0 度以及深度 2 公里到深度 180 公里的範圍。該系統結合了質心矩張 (CMT) 反演技術、網格搜索方法、使用頻譜元素法計算的三維格林函數和實時寬頻地震記錄，在地震發生後的兩分鐘內可以提供地震事件的發震時間、震源位置、地震矩規模和震源機制。本報告比較了 RMT 在 2022 年 1 月至 2023 年 9 月 RMT 所偵測到的地震事件與中央氣象署地震重定位目錄，發震時間和震央位置的平均差異分別約 0.91 秒和 4.6 公里。針對 2022 年的池上地震序列、玉里地震序列、花蓮外海的南澳海盆地震群以及 2023 年的嘉義地震群與蘭嶼地震群，RMT 系統亦提供了良好的震源與質心參數。

關鍵字：即時監測、地震矩張量逆推、震源參數、地震質心、計算地震學

Abstract

Real-time Moment Tensor System (RMT) is an earthquake monitoring system designed for automatic seismic activity detection in Taiwan. The monitoring region covers from 119.2°E to 123.0°E, and from 21.0°N to 26.0°N, with depths ranging from 2 km to 180 km. The system combines centroid moment tensor (CMT) inversion techniques, grid search methods, 3D Green's functions calculated using the spectral-element method, and real-time broadband seismic recordings to provide the original time, hypocenter location, moment magnitude, and focal mechanism of seismic events within two minutes of their occurrence. This report compares the results of the seismic events detected by the RMT between Jan. 2022 and Sep. 2023 with those in the earthquake relocation catalog of the Central Weather Bureau (CWB). The average

differences in the event time and hypocenter location are less than 0.91 seconds and 4.6 kilometers, respectively. The RMT system also provided good solutions for the source parameters of the Chiashan earthquake sequence, the Yuli earthquake sequence, and the earthquake swarm southwest of Yonaguni Island (offshore of Hualien) in 2022 and Chiayi earthquake swarm and Lanyu earthquake swarm in 2023.

Key words: Real-time monitoring, moment tensor inversion, source parameters, earthquake centroid, computational seismology

前言

即時地震矩張量監測系統(Real-time Moment Tensor monitoring system, RMT)透過臺灣寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)、日本F-net的YNGF測站及中央氣象署PCYB測站之即時訊號，結合中心地震矩張量(centroid moment tensor, CMT)逆推、格點搜尋演算法(grid-based search algorithm)以及三維格林函數(three dimensional Green' s function)即時進行臺灣地區的地震偵測。本系統利用格點($0.045^{\circ} \times 0.045^{\circ} \times 2\text{km}$)搜尋法，於東經119.2度至123.0度、北緯21.0度至26.0度與深度2公里至180公里範圍內，透過預先建置的三維格林函數演算模擬波形(0.02 Hz - 0.1 Hz)，並將演算結果與寬頻地震儀接收的訊號進行全波形擬合，以每兩秒的時間間隔即時地連續分析地震訊號(圖1)。系統可於地震發生之後約2分鐘提供地震報告，所提供之即時震源參數包含發震時間、震央位置、震源深度、地震矩規模以及震源機制等資訊。未來希望藉由這樣的即時訊號處理系統，在災害性地震發生之時，迅速產生震源資料以提供政府應變與救災的參考。
(<http://rmt.earth.sinica.edu.tw/>)

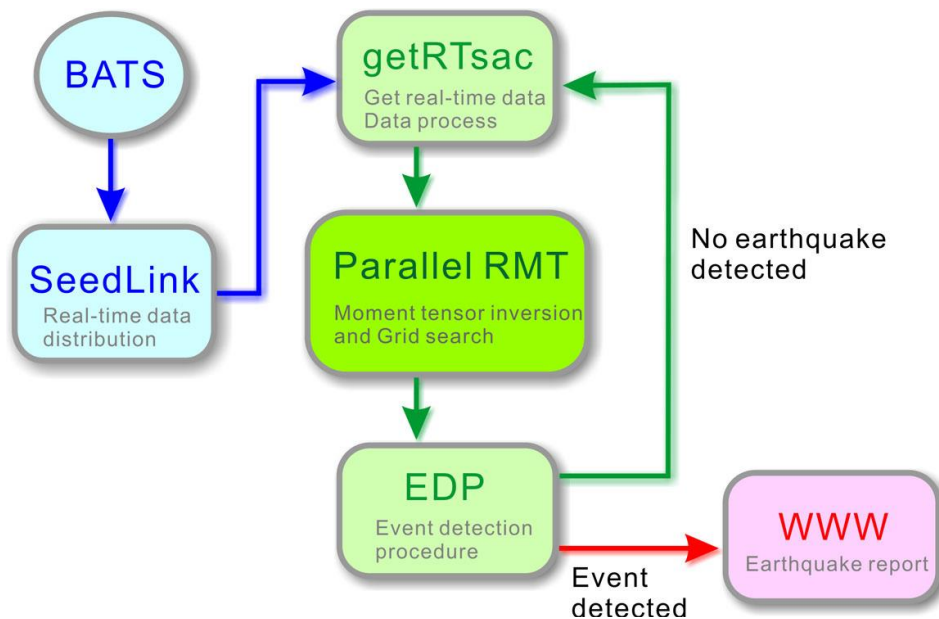


圖1、RMT系統之運作流程。

監測結果

自2022年1月至2023年11月初為止，RMT系統（以下稱本系統）共偵測得467筆地震事件（如表1所列），其中最小的RMT地震矩規模為3.17（氣象署2023年速報小區域地震，UTC時間2023年2月17日01時08分，芮氏地震規模3.3），最大的RMT地震矩規模為6.95（氣象署2022年速報編號111號地震，UTC時間2022年9月18日06時44分，芮氏地震規模6.8）。其中307筆屬於2022年，總數遠大於過去數年平均的紀錄數。震央及深度分佈如圖2，彩色震源機制解為本系統所偵測得之地震，其中約39%（181/467）為氣象署速報編號地震，灰色圓形為對應的氣象署地震震央位置，編號地震偵測率約為69%（181/262）。以氣象署地震速報資訊為基準，比較RMT系統及氣象署速報或重定位均有紀錄的429筆地震的規模、發震時間及震源位置，統計結果如圖3。其中規模之差值(dM)的平均為-0.39個規模；時間差值(delay time)平均為0.91秒；震源深度差值(dDepth)平均為4.6公里；水平震央差值(dEpicenter)平均約為4.1公里，整體結果與過去數年相當。

此次統計區間的地震分布可依地理位置及地震事件區分出七個較特殊的地震群：(1) 2022/09/18池上地震序列、(2) 2022/03/22花蓮地震序列、(3) 南澳海盆地震群、(4) 三地門地震群、(5) 嘉義地震群、(6) 獅子鄉地震群與(7) 蘭嶼地震群，各地震群之特性及背景簡述如下：

(1) 2022/09/18 池上地震序列

池上地區位於菲律賓海板塊與臺灣本島交界帶南段，縱谷斷層（包括池上斷層和關山斷層）之上，過去此地區地震多以南北走向逆衝走滑機制為主，與島弧系統擠壓斷裂有密切關聯。本系統自2022年9月17日起到11月中，於此區域紀錄到多達75筆地震事件，其中主震（池上地震）發生於9月18日，RMT地震矩規模達6.95（氣象署2022年速報編號111號地震，UTC時間2022年9月18日06時44分，芮氏地震規模6.8）。有一前震發生於9月17日，RMT地震矩規模達6.55（氣象署2022年速報編號086號地震，UTC時間2022年9月17日13時41分，芮氏地震規模6.6），圖4-1中0918及0917之標示各為其所在位置。扣除主震與前震，RMT於此序列共偵測得73個餘震事件（包含前震與主震間之地震），主要分佈於10公里深至20公里深之間，由剖面可大致區分為東西兩群，西側一群數量較多，大部分具有順著縱谷走向且向西傾的逆衝機制，機制分稍嫌散亂，但隱約可見一西傾連線，暗示著可能存在的中央山脈斷層系統的南端部分。東側一群數量較少，分佈相對較深，大部分亦具有順著縱谷走向的機制。圖4-2至圖4-4依序分別為本地震序列之主震、前震與最大餘震之RMT記錄。

(2) 2022/03/22 玉里地震序列

玉里地區位於池上斷層北部、歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊聚合的縫合帶的縱谷斷層系統之中，地震活動活躍。附近地區於2003年與2013年曾發生成功地震（芮氏地震規模6.4）與瑞穗地震（芮氏地震規模6.4）。本系統自2022年3月22日（UTC時間）起至6月中，於此區域紀錄到46筆地震事件，其中主震（玉里地震）發生於3月22日，位於近岸，RMT地震矩規模達6.67（氣象署2022年速報編號019號地震，UTC時間2022年3月22日17時41分，芮氏地震規模6.7）。次大的餘震同樣

發生於3月22日，在主震後3小時，RMT地震舉規模達5.8（氣象署2022年速報編號024號地震，UTC時間2022年3月22日20時29分，芮氏地震規模6.0），圖5-1中322a及322b之標示各為其所在位置。根據氣象署紀錄本次地震序列的最大餘震發生在主震後2分鐘之內，由於RMT系統使用100秒連續資料分析並偵測地震，故無法明確區分出本次的最大餘震。扣除主震，RMT於玉里地震附近共偵測得45個餘震事件，主要分佈於20公里深至40公里深之間，由剖面可發現無論是氣象署重定位結果或是RMT餘震紀錄皆為由西而東漸深，且均呈現相當清晰的東傾分布，大部分機制均為高角度逆衝斷層，主震位於序列中較深的位置，且整體地震序列分佈亦較深，可能為池上斷層北部的深部活動所致。圖5-2與圖5-3依序分別為本地震序列之主震與次大餘震之RMT記錄。

(3) 南澳海盆地震群

本報告所定義的與南澳海盆地震群位於花蓮東部外海，與那國島西南方的琉球隱沒帶的弧前，此區地震明顯呈現出一個集中的群集，歷年觀測中時而會相當活躍。自2022年1月起至2023年10月為止，於此區紀錄到79筆地震事件，其中規模大於6.0的紀錄有2筆。最大RMT地震矩規模達到6.20，發生於2022年1月3日（氣象署2022年速報編號001號地震，UTC時間2022年01月03日09時46分，芮氏地震規模6.0），次大RMT地震矩規模為6.16，發生於2022年5月9日（氣象署2022年速報編號054號地震，UTC時間2022年05月09日06時23分，芮氏地震規模6.2），最小的RMT地震矩規模為3.54。由圖6-1的剖面上觀察，機制主要分佈在20公里深到30公里深之間，同時間段的氣象署重定位紀錄亦可見較大的地震分佈在相同區間。無論是背景地震、RMT地震紀錄或氣象署同時段的重定位紀錄分佈，均可以在約45度走向的剖面上觀察到相較於其他方向較密集的地震帶分佈，並略為向西北方傾斜緩緩變深。RMT紀錄的空間分佈與機制亦大致吻合此一趨勢，呈現低角度帶滑移的逆衝斷層，反映出琉球海溝向北隱沒的型態。圖6-2至圖6-4為本地震群規模最大的三筆RMT地震記錄。

(4) 三地門地震群

本報告所定義之三地門地震群發生於屏東三地門附近，靠近潮州斷層。RMT系統自2023年6月起至2023年7月為止，於此區紀錄到4筆地震事件。其中最大RMT地震矩規模達到4.86，發生於2023年6月10日（氣象署2023年速報編號038號地震，UTC時間2023年06月10日05時31分，芮氏地震規模5.4）。由圖7-1剖面上觀察，機制分佈在20公里深左右，同時間段的氣象署重定位紀錄約分布在15公里深至20公里深之間，可觀察到向東南傾斜的面較為清晰。RMT的結果均呈現為南北走向帶左移或東北西南走向帶右移的機制，其中南北向的機制與附近潮州斷層的走向以及其高角度傾角大致吻合。惟氣象署重定位結果在東北西南走向的面上有較為清晰的分布，其中是否有關聯有待後續其它研究討論。圖7-2為本地震群規模最大的RMT地震記錄。

(5) 嘉義地震群

本報告所定義之嘉義地震群發生於嘉義縣新港鄉附近，根據氣象署重定位結

果，此群地震明顯呈現出一個相當集中的群集，背景地震相對本島其它區域較為稀少。RMT系統自2023年8月起至2023年10月為止，於此區紀錄到3筆地震事件。其中最大RMT地震矩規模達到4.94，發生於2023年9月5日（氣象署2023年速報編號065號地震，UTC時間2023年09月05日17時30分，芮氏地震規模5.5），其餘紀錄之RMT規模均小於4.0。由圖8-1的剖面上觀察，機制分佈在5公里深到10公里深之間。同時間段的氣象署重定位紀錄集中在一個約長4公里寬3公里的區間，約略呈現東西向分佈。由震源分佈來看，氣象署重定位結果與RMT約有4公里差距，且RMT分佈為南北向。但此群地震規模不大又相當密集，因此此差異可能是受本系統精度影響而產生，而非反映出破裂形態。RMT機制呈現為東西向右移或南北向左移的機制，其中東西向的機制與氣象署重定位震央的分佈形態以及更東邊的梅山斷層走向大致吻合，其中是否有關聯則有待後續其它研究討論。圖8-2為本地震群規模最大的RMT地震記錄。

(6) 獅子鄉地震群

本報告所定義之獅子鄉地震發生於屏東獅子鄉附近。RMT系統在2023年9月，於此區紀錄到2筆地震事件。其中最大RMT地震矩規模為4.48，發生於2023年9月5日（氣象署2023年速報編號064號地震，UTC時間2023年09月05日03時13分，芮氏地震規模4.7），另一UTC時間9月16日紀錄的RMT規模為3.51。由圖9-1剖面上觀察，RMT機制分佈在約15公里深，同時間段的氣象署重定位紀錄集中在一個約長5公里寬3公里的區間，約略呈現南北向分佈。RMT的結果均呈現東西向右移或南北向左移的機制，且兩者為東西向排列。但氣象署重定位震央的分佈形態與南北走向的機制較為吻合，且第二筆紀錄之震央較遠離餘震群，兩筆紀錄是否存在關聯性有待後續其它研究討論。圖9-2為本群地震中規模最大的RMT地震記錄。

(7) 蘭嶼地震群

本報告所定義的蘭嶼地震群位於蘭嶼南方，綠島、蘭嶼與小蘭嶼均為宋島弧系統北端上的火山島，相較於臺灣本島的海岸山脈，三島海域位於弧陸碰撞前緣，地體構造複雜。此區在歷年觀測中，時而會有活躍的地震群出現。自2023年7月起至2023年8月初為止，於此區紀錄17筆地震事件。最大RMT地震矩規模達到5.66，發生於2023年7月9日（氣象署2023年速報編號045號地震，UTC時間2023年07月08日19時47分，芮氏地震規模5.4），次大RMT地震矩規模為4.99，發生於2023年7月9日（氣象署2023年速報編號047號地震，UTC時間2023年07月08日21時22分，芮氏地震規模5.3），最小的RMT地震矩規模為3.31。由圖10-1剖面上觀察，機制主要分佈在5公里深左右的地方。同時間段的氣象署重定位紀錄則分佈在0到30公里深的區間，且較大地震的位置偏深。其中差異可能肇因於外海較不準確的速度構造。RMT機制解皆為近正東西的走向、傾角介於40-50度之張裂型震源機制，且CLVD分量可高達50%。圖10-2至圖10-4為本地震群規模最大的三筆RMT地震記錄。

總結

綜觀此次統計區間的震源機制的分布圖(圖2)，雖然在數量上略高於過去的年度記錄，但其主貢獻來自於池上地震餘震、玉里地震餘震與其他RMT規模接近6.0地震的餘震，震央的分佈情形與過去紀錄無特別差異，陸上地震多數分布於10-30公里深度範圍內，以淺層逆衝型地震為主，伴隨少數走向滑移地震與中央山脈內部之張裂型地震；70公里以上較深部之中層地震與過去相當，主要發生於宜蘭、宜蘭近海、沖繩海槽與臺東外海區域。於本島東部並有地震分別向東北外海及東南外海延伸，反映出大尺度的構造趨勢。

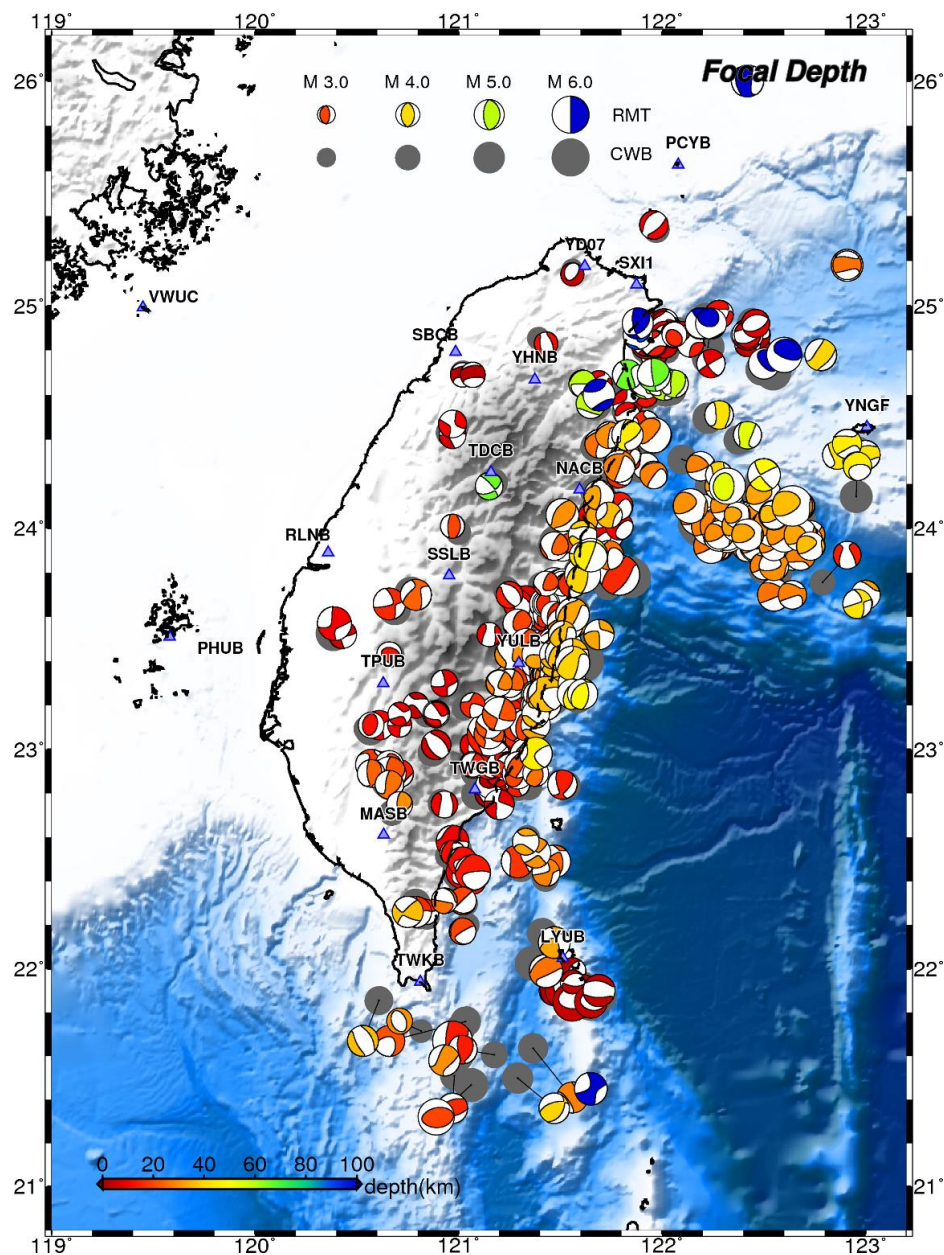


圖2、2022年1月至2023年11月初，RMT監測之震源機制解。三角形為18個即時測站位置，灰色實心圓為氣象署地震報告位置。

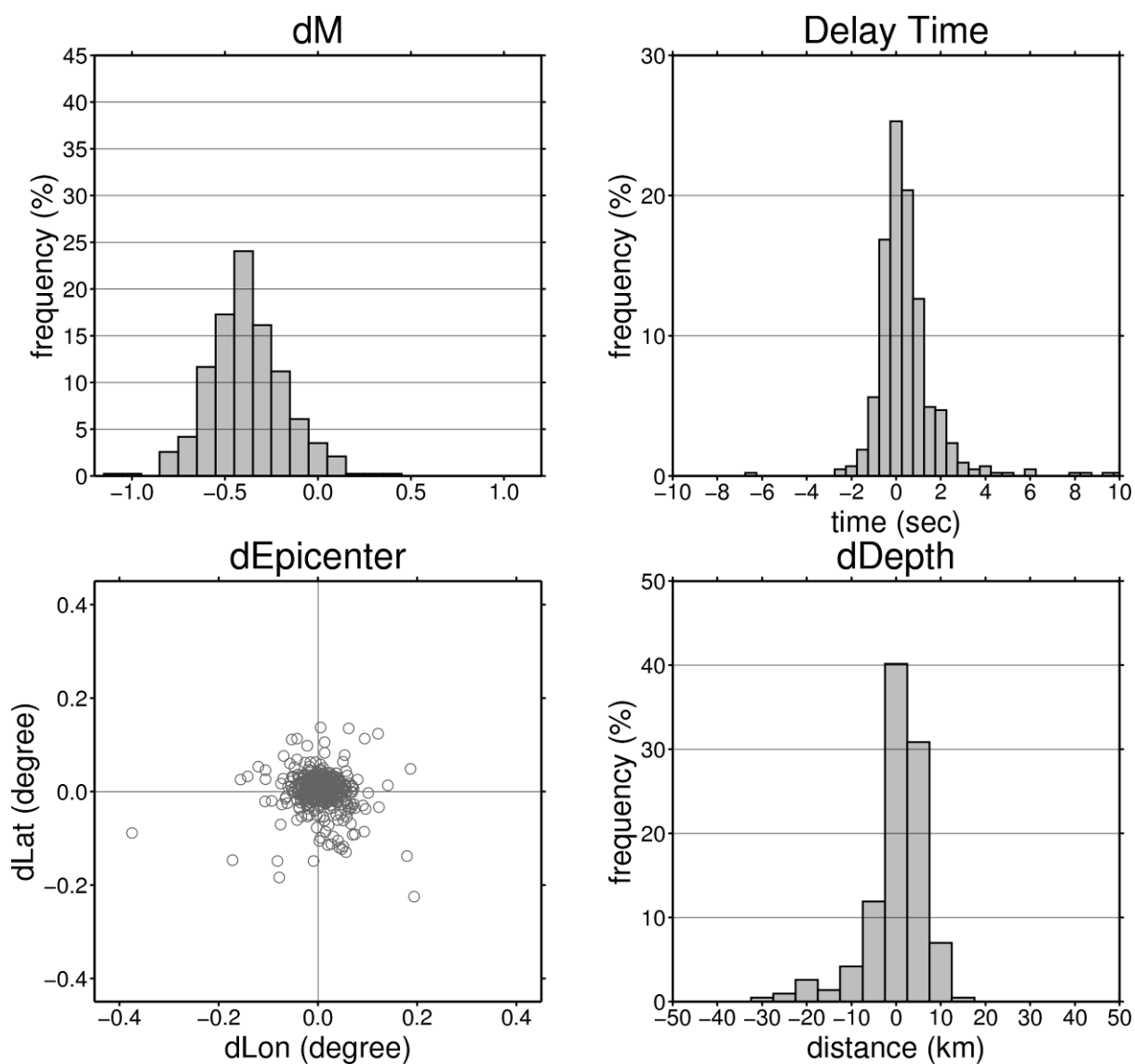


圖3、2022年1月至2023年11月初之RMT地震對CWA地震統計結果。其中規模差值(dM)的平均為-0.39個規模；時間差值(delay time)平均為0.91秒；震源深度差值(dDepth)平均為4.6公里；水平震央差值(dEpicenter)平均約為4.1公里。

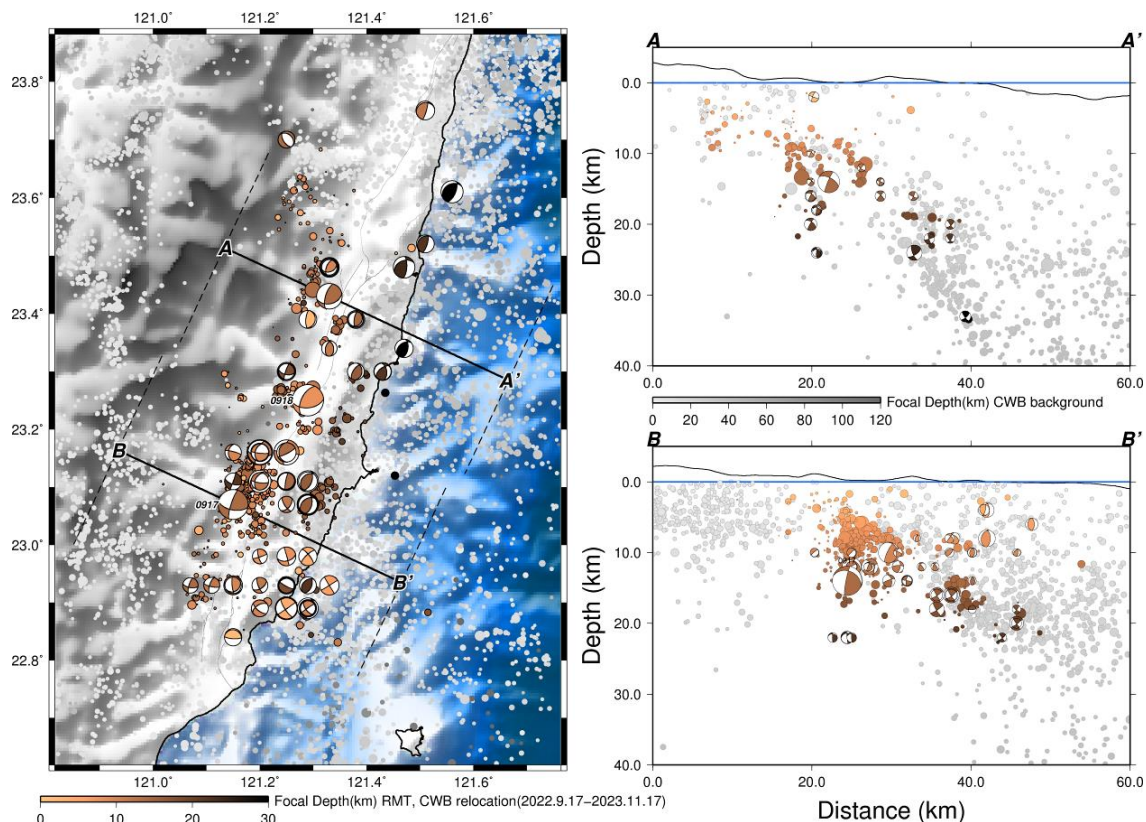


圖4-1、2022/09/18池上地震序列之分佈與剖面圖，灰階圓點為1976年以來的背景地震，土黃色系圓點為池上地震序列的氣象署重定位結果，土黃色系機制為RMT偵測結果。

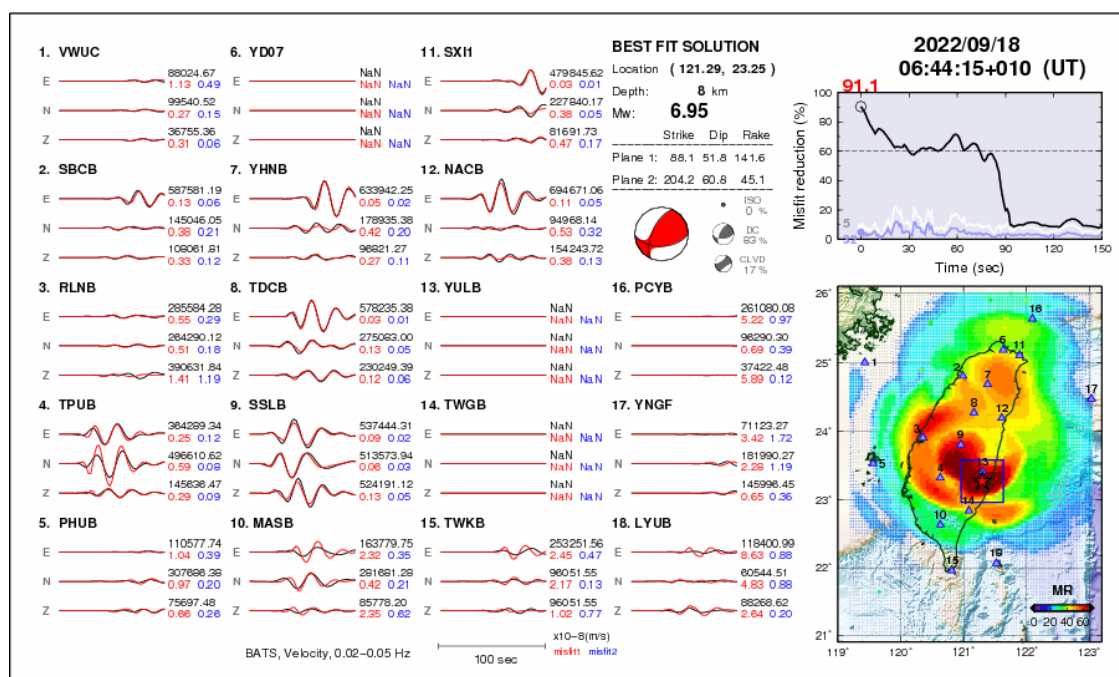


圖 4-2、2022/09/18 池上地震序列主震之 RMT 紀錄。

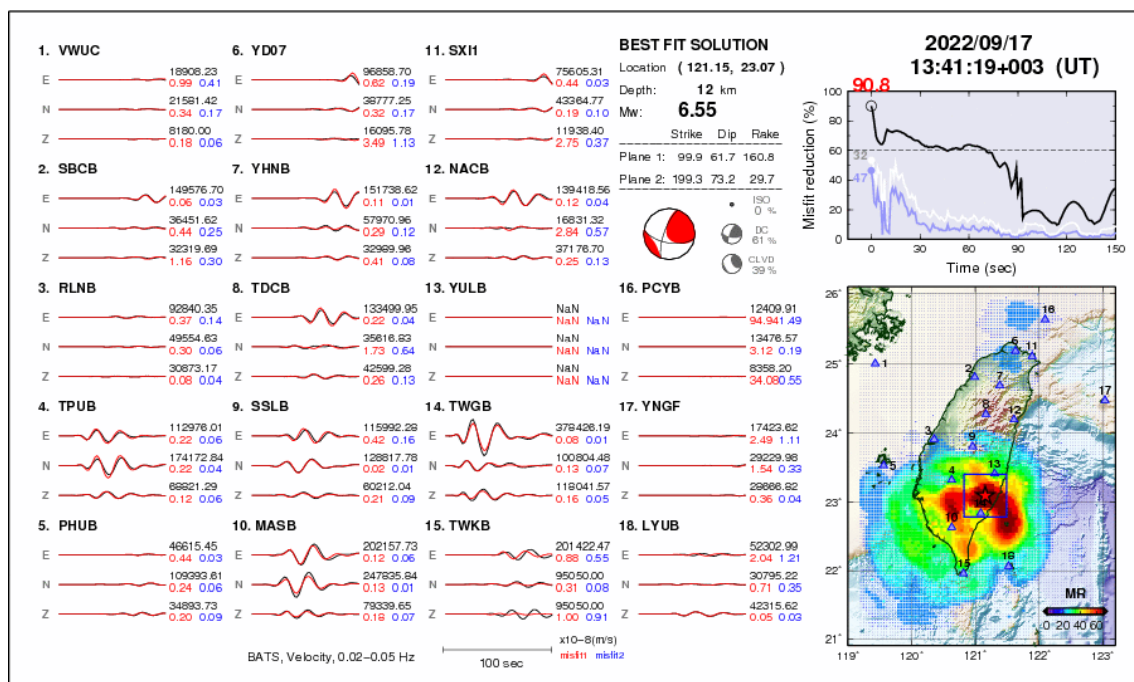


圖 4-5、2022/09/18 池上地震序列前震之 RMT 紀錄。

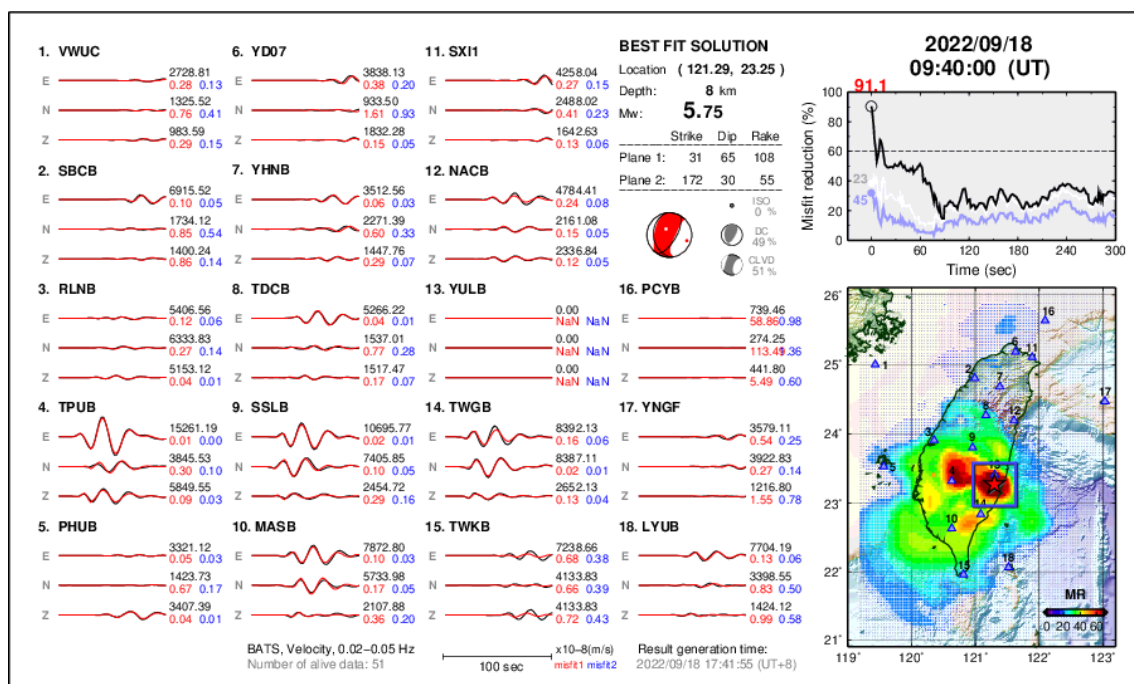


圖 4-6、2022/09/18 池上地震序列最大餘震之 RMT 紀錄。

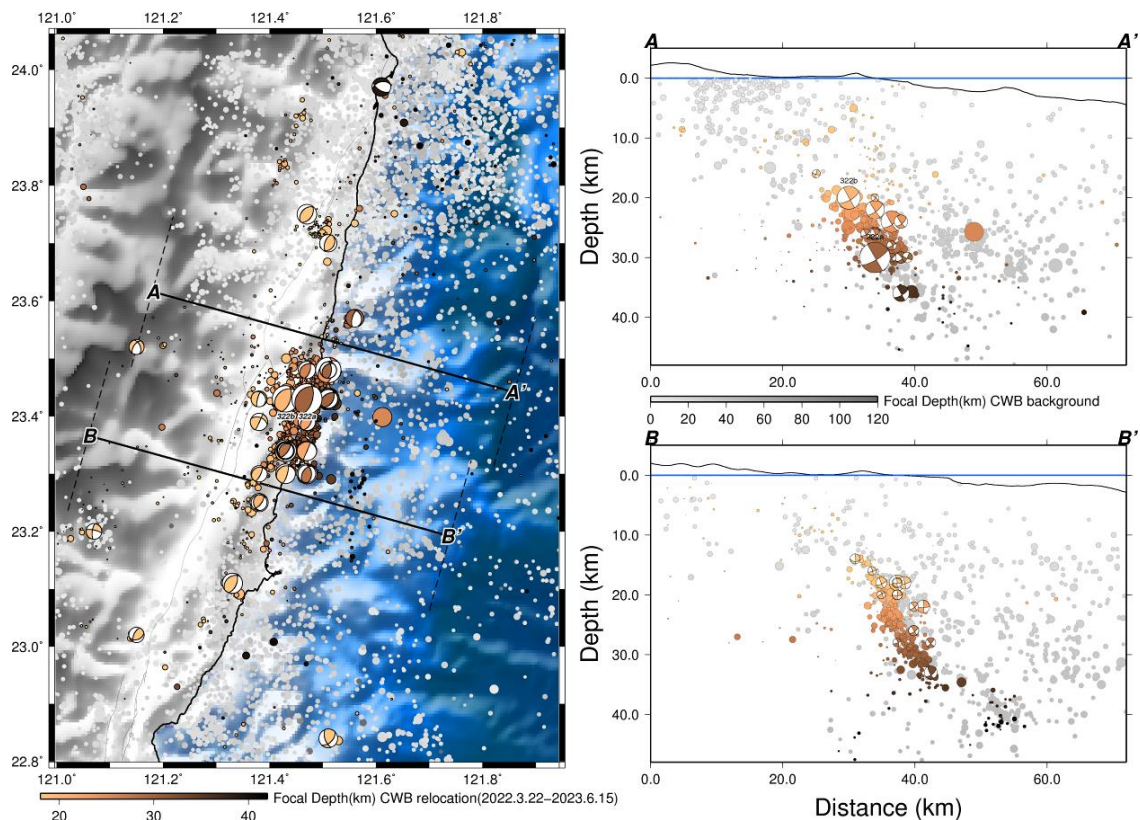


圖 5-1、2022/03/22 玉里地震序列之分佈與剖面圖，灰階圓點為 1976 年以來的背景地震，土黃色系圓點為池上地震序列的氣象署重定位結果，土黃色系機制為 RMT 偵測結果。

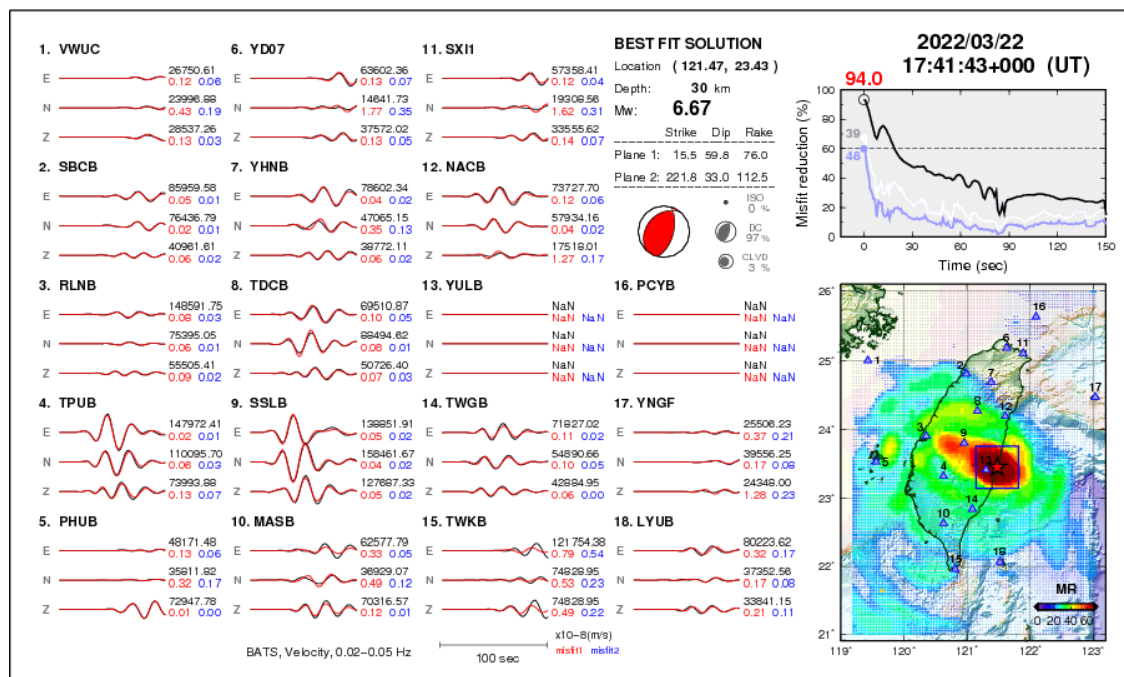


圖 5-2、2022/03/22 玉里地震序列主震之 RMT 紀錄。

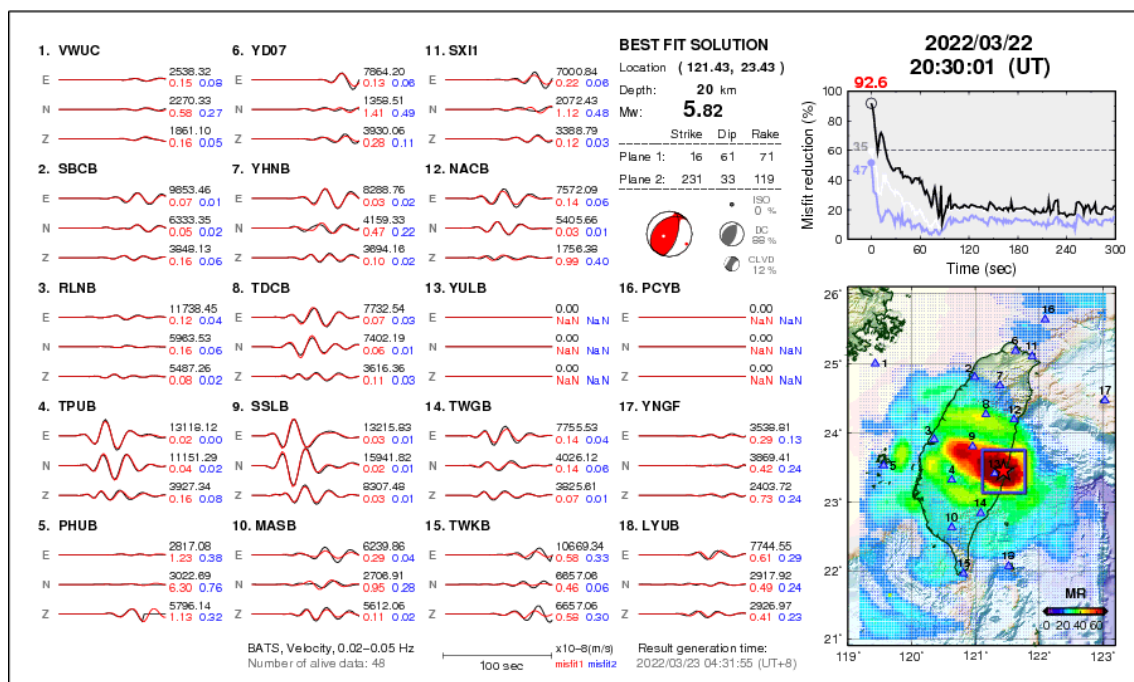


圖 5-3、2022/03/22 玉里地震序列次大餘震之 RMT 紀錄。

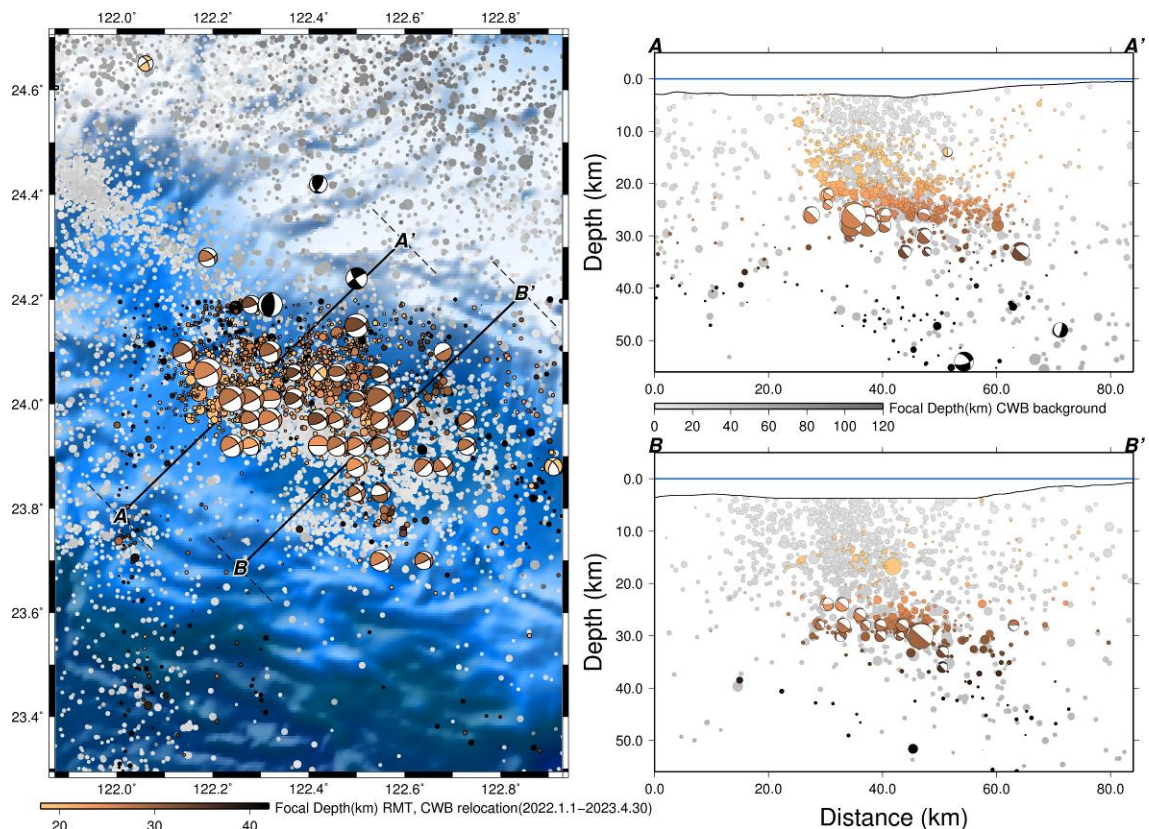


圖 6-1、南澳海盆地震群之分佈與剖面圖，灰階圓點為 1976 年以來的背景地震，土黃色系圓點為池上地震序列的氣象署重定位結果，土黃色系機制為 RMT 偵測結果。

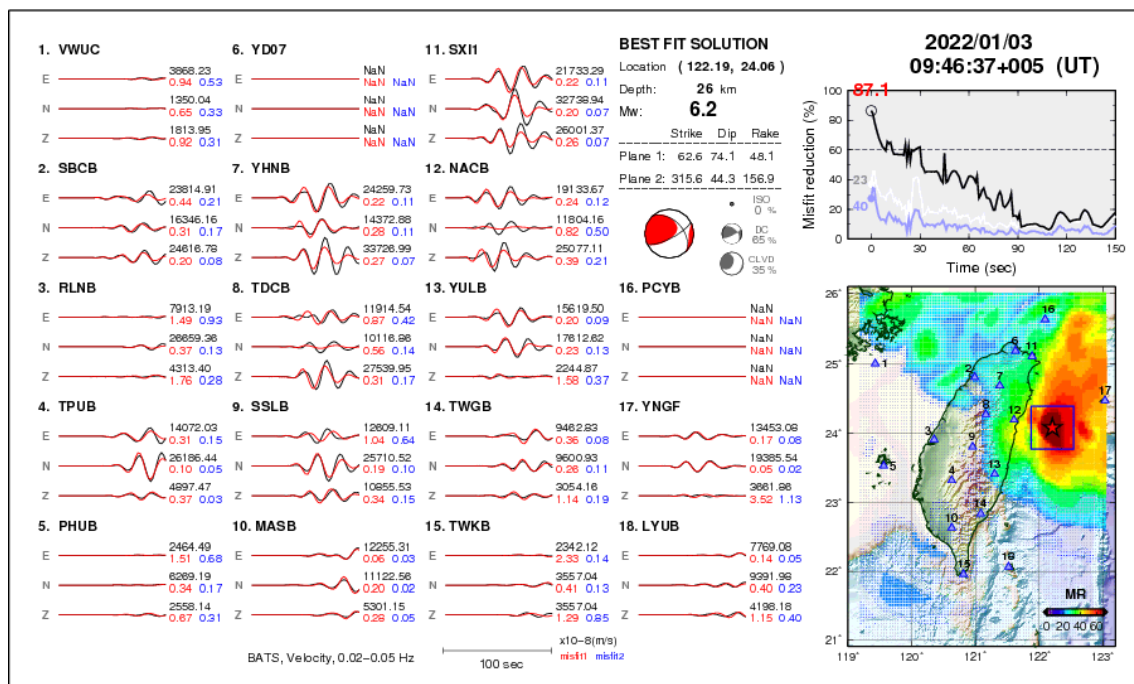


圖 6-2、南澳海盆地震群之 RMT 紀錄之一。

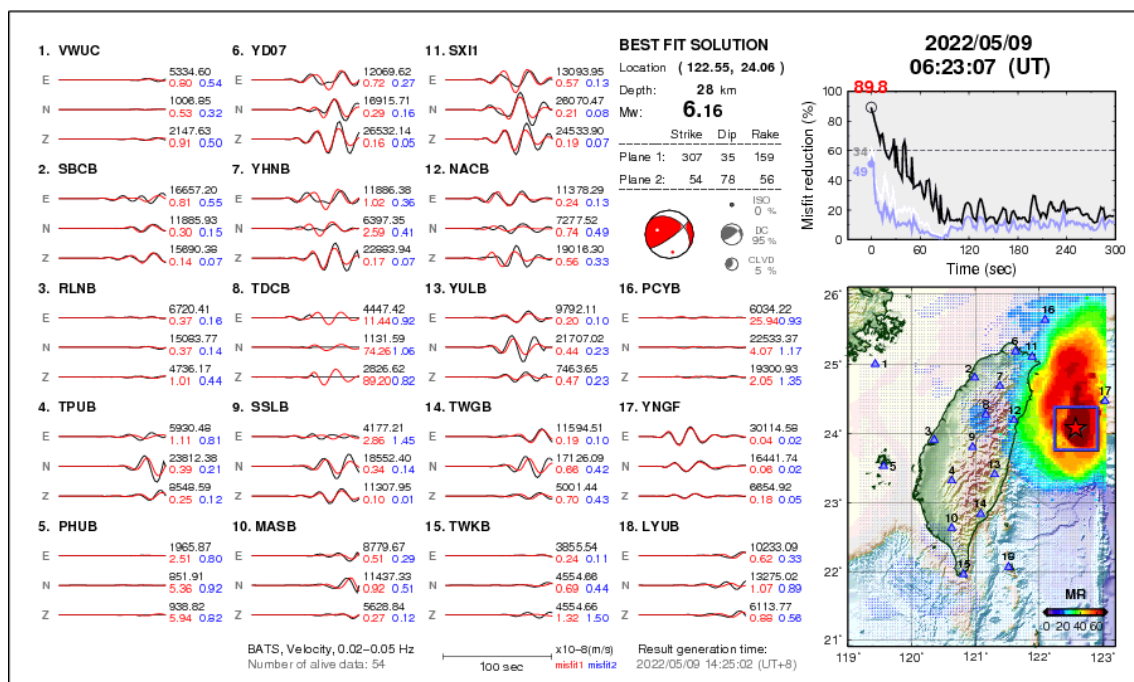


圖 6-3、南澳海盆地震群之 RMT 紀錄之二。

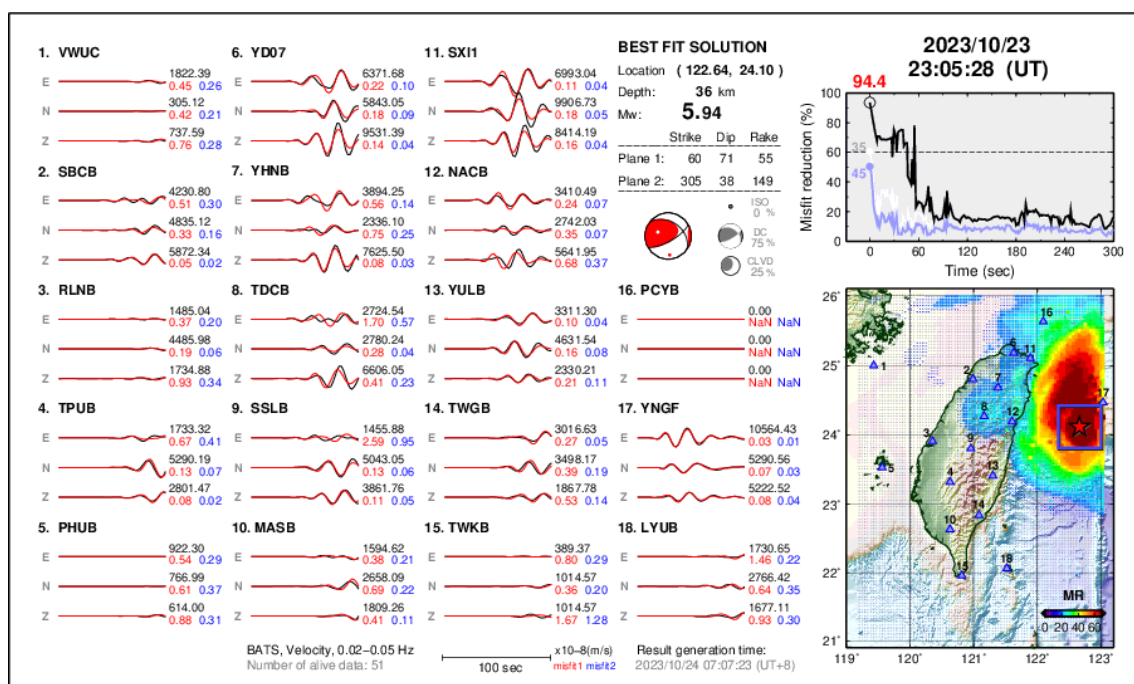


圖 6-4、南澳海盆地震群之 RMT 紀錄之三。

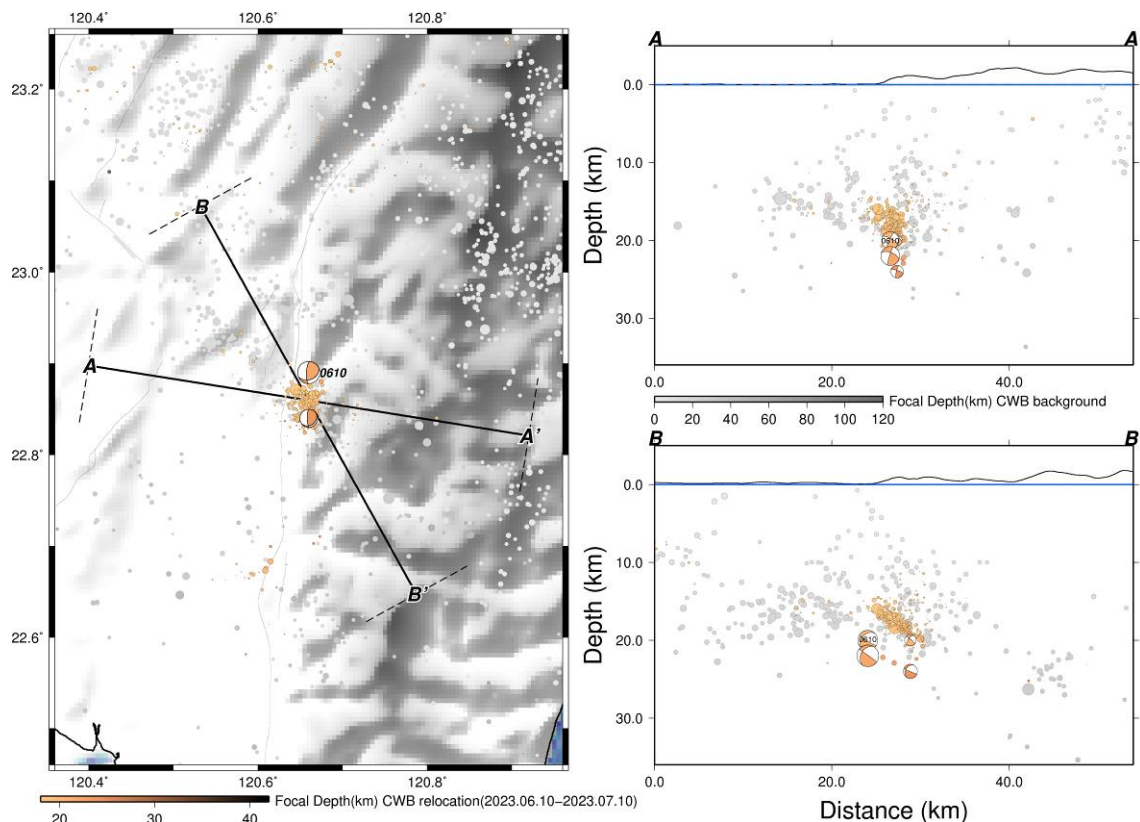


圖 7-1 三地門地震群之分佈與剖面圖，灰階圓點為 1976 年以來的背景地震，土黃色系圓點為氣象署重定位結果，土黃色系機制為 RMT 偵測結果。

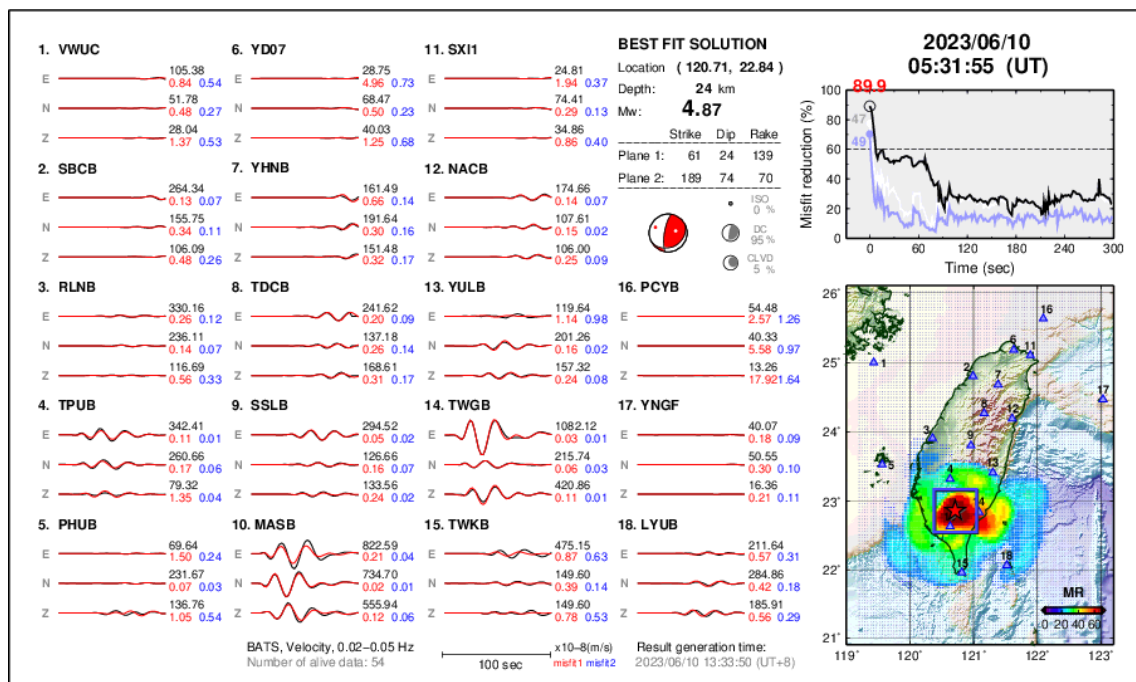


圖 7-2 三地門地震群中最大地震之 RMT 紀錄。

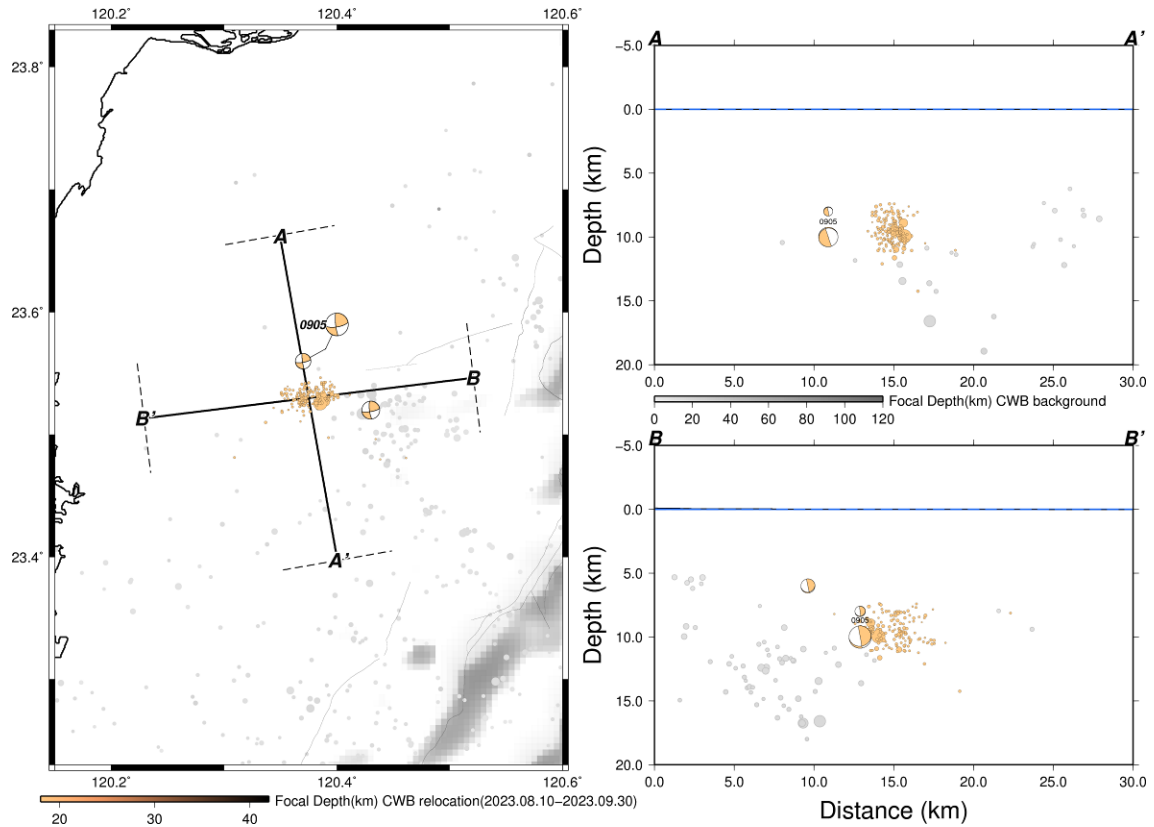


圖 8-1、嘉義地震群之分佈與剖面圖，灰階圓點為 1976 年以來的背景地震，土黃色系圓點為氣象署重定位結果，土黃色系機制為 RMT 偵測結果。

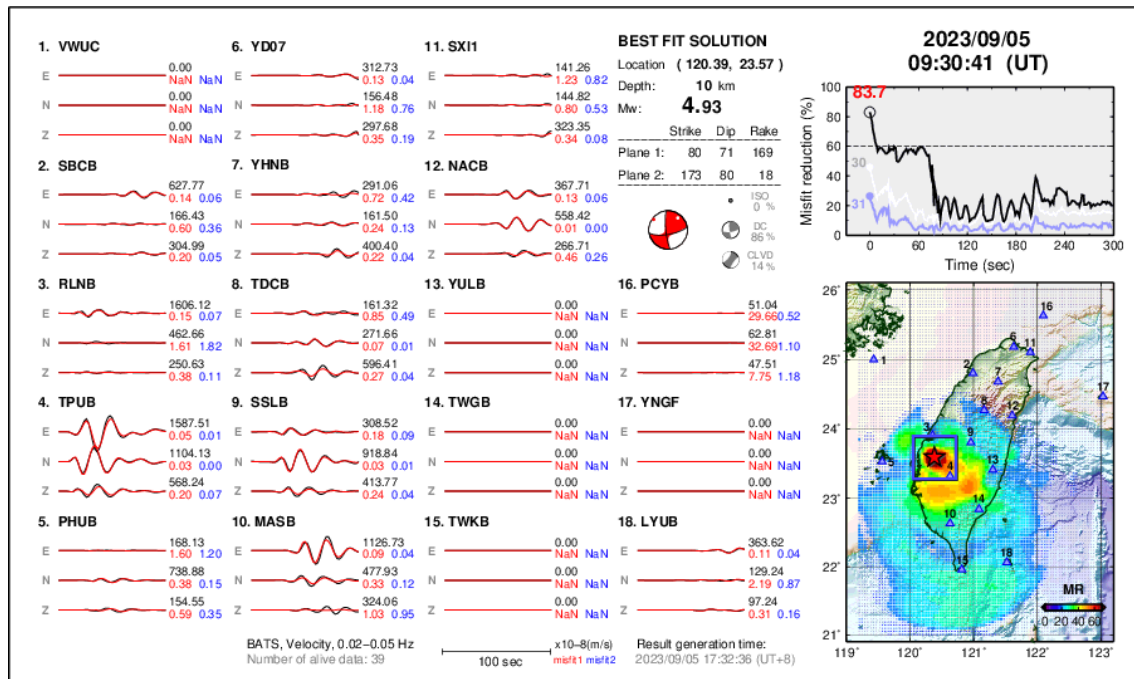


圖 8-2、嘉義地震群中最大地震之 RMT 紀錄。

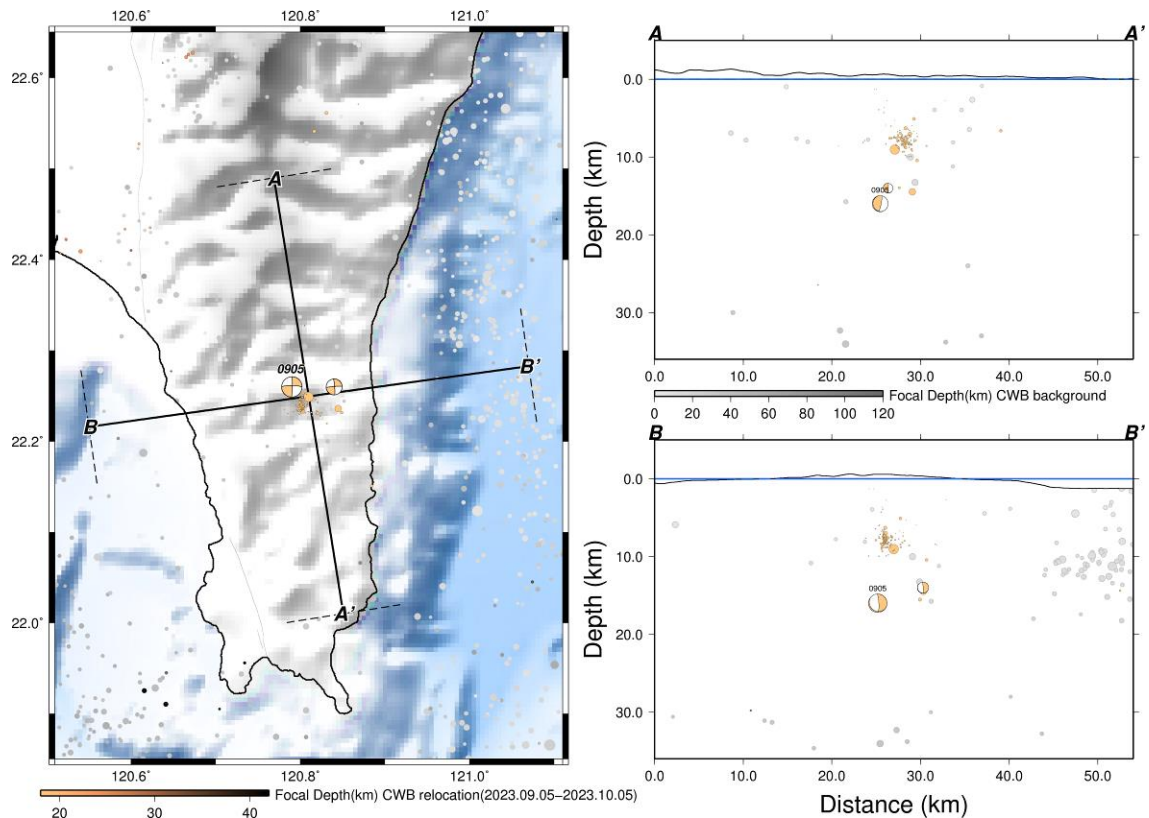


圖 9-1 獅子鄉地震群之分佈與剖面圖，灰階圓點為 1976 年以來的背景地震，土黃色系圓點為氣象署重定位結果，土黃色系機制為 RMT 偵測結果。

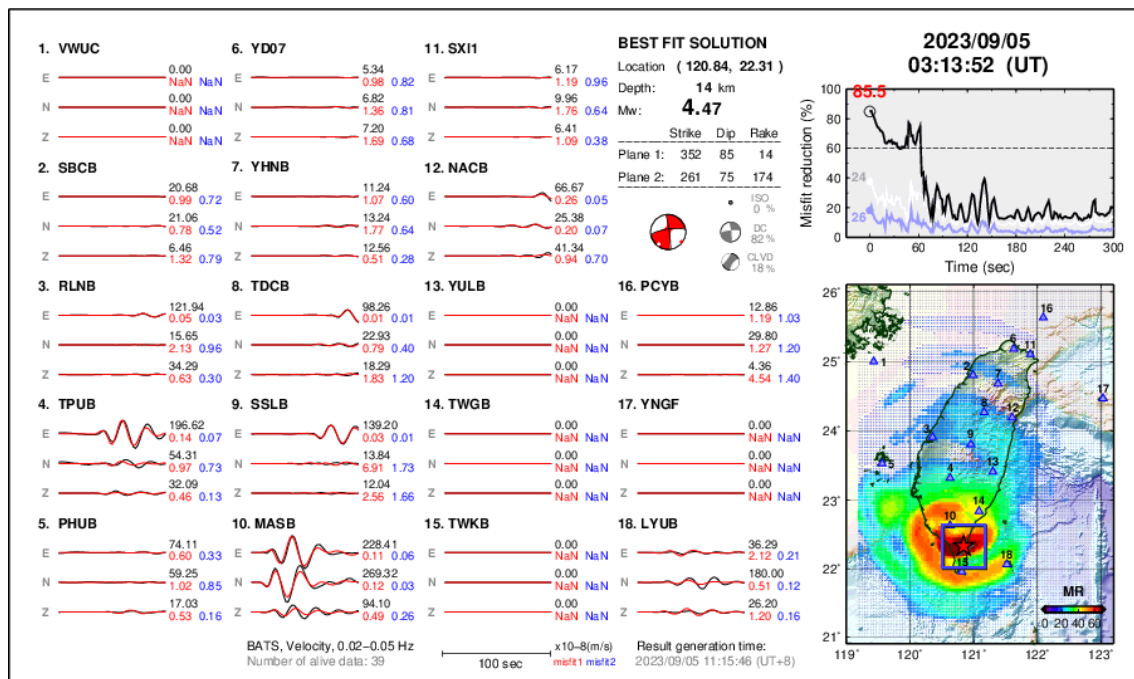


圖 9-2 獅子鄉地震群中最大地震之 RMT 紀錄。

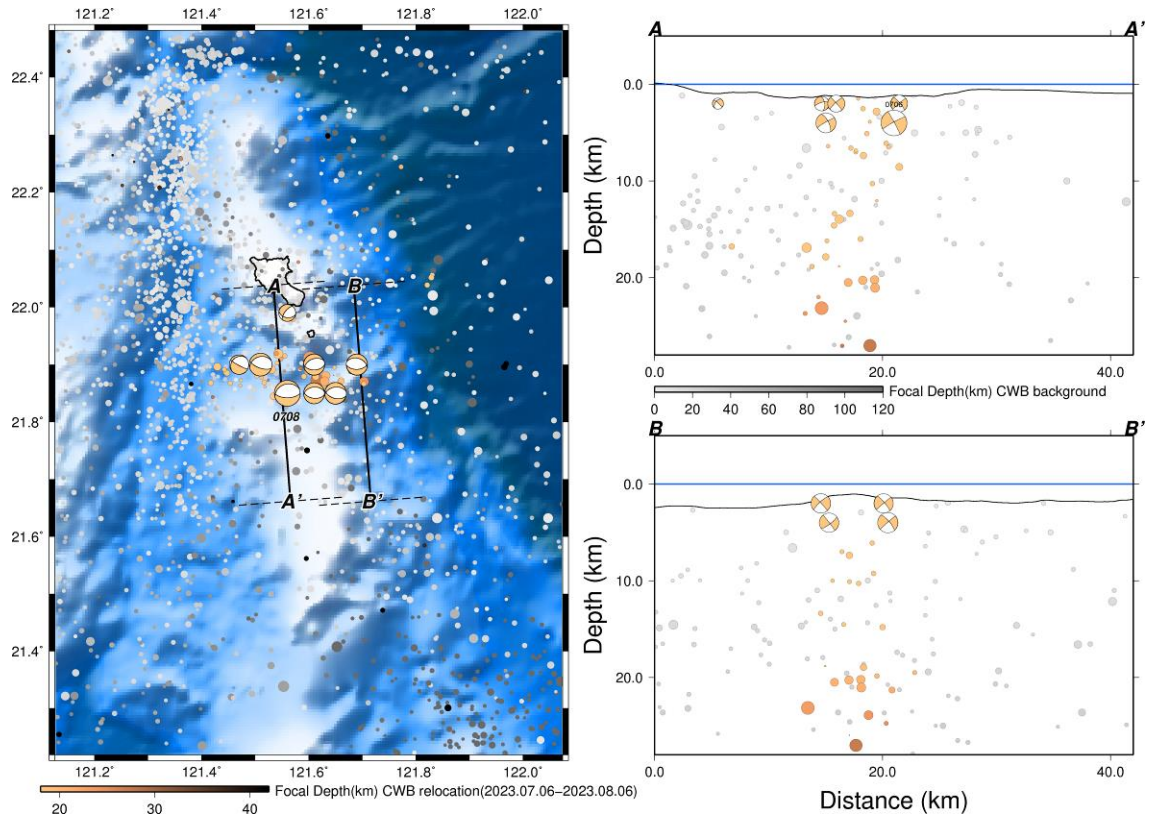


圖 10-1、蘭嶼地震群之分佈與剖面圖，灰階圓點為 1976 年以來的背景地震，土黃色系圓點為氣象署重定位結果，土黃色系機制為 RMT 偵測結果。

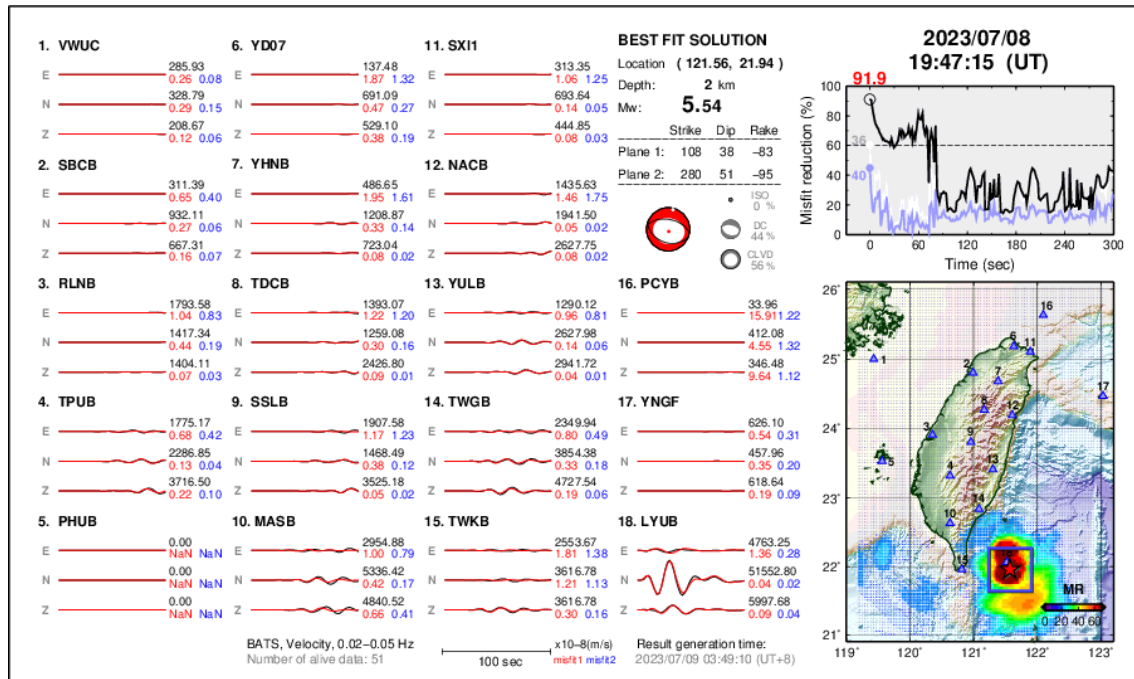


圖 10-2、蘭嶼地震群之 RMT 紀錄之一。

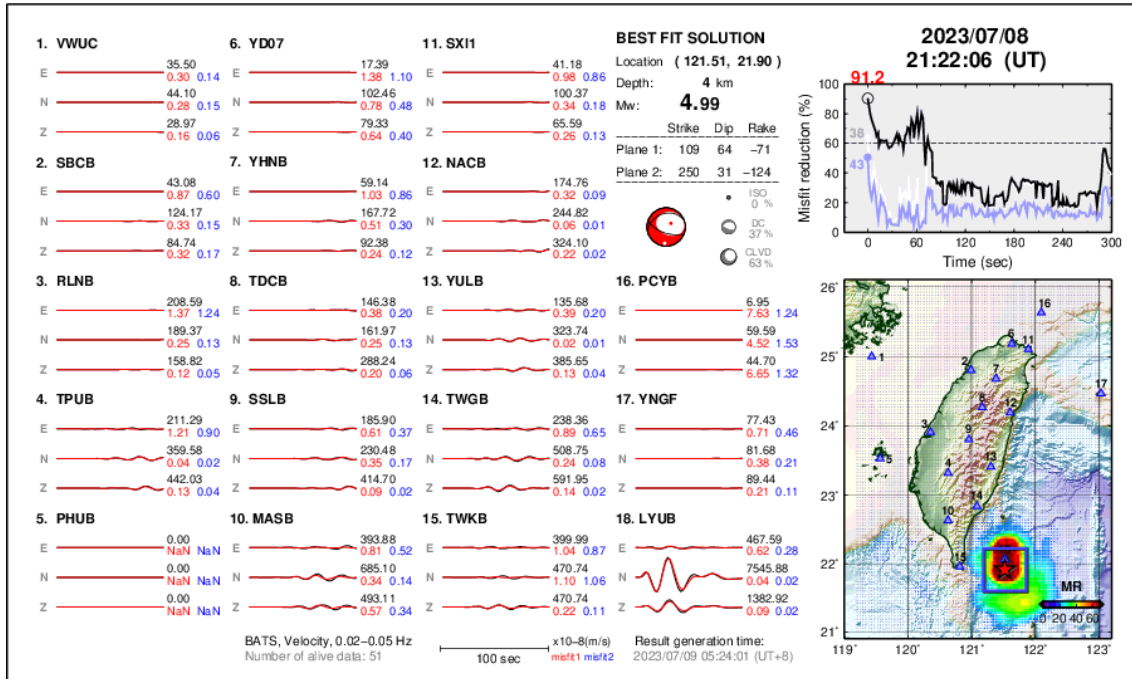


圖 10-3、蘭嶼地震群之 RMT 紀錄之二。

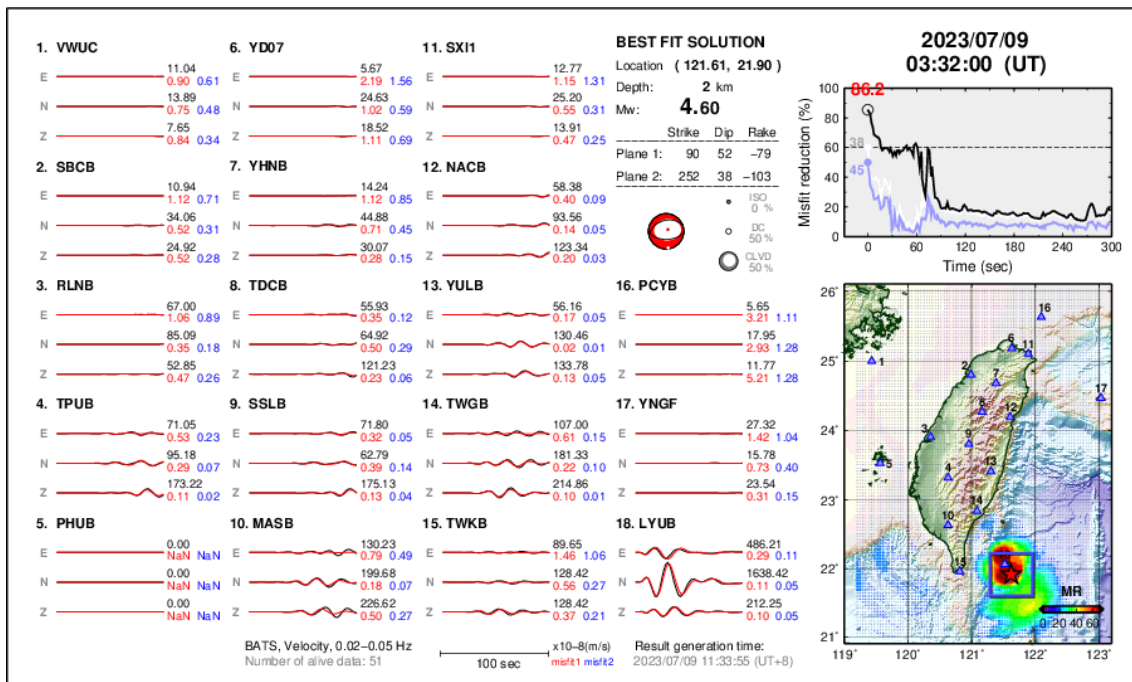


圖 10-4、蘭嶼地震群之 RMT 紀錄之三。

表 1、2022 年 1 月至 2023 年 11 月初之 RMT 地震目錄。

No.	Event Time (UTC)	lon.	lat.	Depth	Mw	MR	str1	dip1	rake1	str2	dip2	rake2
1	2022/01/03 09:46:42	122.19	24.06	26.0	6.20	87.1	62.6	74.1	48.1	315.6	44.3	156.9
2	2022/01/03 23:17:30	122.14	24.10	30.0	5.00	83.1	60.6	77.8	46.9	317.9	44.4	162.4
3	2022/01/05 13:09:04	122.46	23.92	28.0	4.10	81.0	63.4	82.7	51.9	324.2	38.7	168.2
4	2022/01/05 13:11:37	122.46	23.92	28.0	4.60	81.3	62.9	85.1	53.3	326.3	36.9	171.8
5	2022/01/05 13:54:03	120.66	23.43	12.0	3.50	77.4	126.9	46.1	105.8	284.7	46.1	74.2
6	2022/01/12 00:43:26	122.28	24.51	42.0	4.00	69.2	170.3	69.7	70.3	36.1	28.0	132.3
7	2022/01/14 22:16:35	122.55	23.92	30.0	4.20	83.1	61.0	78.5	50.1	317.6	41.2	162.4
8	2022/01/15 02:37:52	122.55	23.92	28.0	3.80	73.9	318.6	34.2	173.4	54.1	86.3	56.0
9	2022/01/15 23:57:17	122.10	24.87	8.0	3.60	75.8	271.5	29.1	-44.7	42.4	70.0	248.5
10	2022/01/16 08:15:42	122.32	24.19	54.0	5.30	88.6	2.3	62.2	84.8	193.4	28.3	99.8
11	2022/01/23 08:22:38	121.92	24.47	14.0	3.50	63.9	7.7	89.8	143.9	97.8	53.9	0.2
12	2022/01/25 14:35:54	121.92	24.65	60.0	4.30	85.9	74.0	25.2	168.1	174.9	85.0	65.3
13	2022/02/04 06:50:53	121.02	24.69	2.0	3.40	67.4	103.7	69.8	115.9	229.2	32.4	40.1
14	2022/02/04 07:06:20	121.07	24.69	2.0	3.50	68.6	248.2	23.6	72.8	86.9	67.5	97.4
15	2022/02/06 23:52:40	121.83	24.56	6.0	3.50	64.3	264.9	40.3	-21.1	11.3	76.6	231.6
16	2022/02/07 10:58:26	121.96	24.42	28.0	5.10	88.1	223.2	89.9	-83.5	313.7	6.5	180.5
17	2022/02/10 09:38:34	122.28	24.01	28.0	4.20	77.2	65.6	72.8	49.3	316.7	43.6	154.6
18	2022/02/11 12:51:30	122.32	24.01	28.0	4.50	82.2	73.9	73.1	60.5	316.8	33.6	148.4
19	2022/02/11 16:43:14	122.28	24.01	28.0	5.60	86.5	63.2	73.2	47.5	315.7	45.1	155.9
20	2022/02/11 17:47:46	122.32	23.97	26.0	4.10	70.8	57.9	74.7	38.9	315.8	52.7	160.6
21	2022/02/11 18:19:32	122.32	24.01	28.0	4.00	73.3	61.4	75.7	53.4	313.0	38.9	156.8
22	2022/02/12 03:09:36	122.28	23.97	30.0	4.10	69.3	63.9	73.0	46.2	316.9	46.3	156.2
23	2022/02/16 05:41:59	121.47	23.92	24.0	4.00	68.1	101.1	35.9	164.1	204.1	80.7	55.1
24	2022/02/16 15:23:02	122.91	24.38	45.0	4.10	76.9	46.1	69.3	41.2	298.9	51.9	153.4
25	2022/02/20 06:39:37	122.50	23.92	26.0	4.40	78.1	62.5	79.9	56.2	317.9	35.1	162.3
26	2022/02/20 10:49:43	122.50	23.88	24.0	4.50	81.4	63.2	80.6	51.8	321.5	39.2	165.0
27	2022/03/04 07:54:47	121.07	23.02	10.0	3.50	61.3	190.4	60.5	-64.2	325.9	38.4	232.4
28	2022/03/06 03:51:55	122.24	24.92	120.0	4.40	73.0	2.6	45.7	150.0	114.6	69.0	48.4
29	2022/03/06 16:08:09	122.06	24.87	8.0	3.80	78.1	242.9	21.4	-68.0	39.5	70.3	261.7
30	2022/03/07 18:06:00	122.96	24.28	45.0	4.10	84.3	163.8	17.0	-14.7	267.9	85.7	253.6
31	2022/03/09 12:22:14	121.43	23.25	36.0	5.20	95.4	150.7	65.5	-28.4	253.4	64.4	207.4

32	2022/03/12	05:12:55	122.91	23.88	14.0	3.90	77.1	210.1	54.1	-35.0	322.4	62.3	221.5
33	2022/03/15	21:00:10	122.73	23.92	36.0	4.00	85.2	55.7	74.4	53.3	305.9	39.4	155.0
34	2022/03/16	00:34:53	120.75	22.26	36.0	4.50	85.6	219.8	75.5	23.9	123.5	66.9	164.2
35	2022/03/17	01:33:30	122.14	24.83	8.0	3.70	74.7	279.4	47.5	-41.8	40.5	60.5	230.9
36	2022/03/18	12:50:57	122.24	23.92	26.0	4.50	73.9	62.3	77.9	44.9	320.4	46.4	163.1
37	2022/03/19	15:23:42	120.66	23.66	16.0	4.60	89.5	343.4	66.3	-10.1	77.5	80.7	204.1
38	2022/03/21	23:09:13	122.24	23.92	26.0	5.00	77.1	61.2	82.3	47.4	322.9	43.1	168.6
39	2022/03/22	17:06:56	121.43	21.99	26.0	4.80	82.5	67.7	67.5	100.7	221.5	24.8	66.0
40	2022/03/22	17:41:43	121.47	23.43	30.0	6.67	94.1	15.5	59.8	76.0	221.8	33.0	112.5
41	2022/03/22	18:37:51	121.51	23.43	36.0	4.90	75.7	13.9	60.2	70.7	229.2	35.0	120.0
42	2022/03/22	19:35:06	121.51	23.48	24.0	5.60	93.8	5.4	58.7	63.2	229.7	40.3	126.6
43	2022/03/22	20:30:01	121.43	23.43	20.0	5.80	93.2	16.8	60.5	72.0	230.2	34.1	118.6
44	2022/03/22	21:41:09	121.43	23.34	18.0	4.80	94.7	15.2	79.3	77.9	244.2	16.1	137.8
45	2022/03/22	22:26:18	121.47	23.39	26.0	3.90	70.6	11.5	59.6	48.5	251.7	49.7	138.5
46	2022/03/22	22:43:25	121.47	23.43	26.0	4.40	88.2	13.2	60.3	71.0	228.0	34.7	119.8
47	2022/03/22	23:08:38	121.43	23.34	18.0	3.90	83.9	15.6	81.2	79.6	245.7	13.6	139.4
48	2022/03/22	23:09:49	121.43	23.34	18.0	3.60	68.1	15.9	86.4	78.7	268.4	11.9	162.1
49	2022/03/23	00:09:58	121.47	23.34	22.0	4.34	93.5	23.1	88.1	79.8	282.9	10.4	169.7
50	2022/03/23	01:55:56	121.47	23.43	30.0	4.31	85.8	343.5	63.0	44.6	229.4	51.3	144.5
51	2022/03/23	04:25:49	121.47	23.43	26.0	4.14	83.0	13.0	58.4	70.2	227.5	36.8	118.8
52	2022/03/23	09:19:00	121.43	23.30	18.0	4.30	92.8	16.2	76.4	74.8	245.3	20.3	137.3
53	2022/03/23	09:38:14	121.43	23.34	20.0	3.85	73.1	16.2	89.8	76.6	285.4	13.4	179.2
54	2022/03/23	20:45:30	121.51	23.43	24.0	4.42	88.4	4.2	54.4	55.6	233.8	47.8	128.3
55	2022/03/23	22:55:10	122.91	25.18	26.0	4.56	66.3	299.7	43.5	124.5	76.3	55.4	61.8
56	2022/03/24	00:38:27	121.47	23.43	22.0	5.22	92.6	10.4	55.5	69.1	224.4	39.7	117.4
57	2022/03/24	01:35:11	121.47	23.43	26.0	3.78	74.6	15.1	68.6	61.1	251.6	35.4	141.0
58	2022/03/24	10:03:45	121.47	23.43	30.0	3.76	64.7	26.8	66.5	65.9	255.2	33.1	133.3
59	2022/03/24	10:44:53	121.43	23.34	20.0	3.76	89.5	20.6	88.6	73.7	285.8	16.4	175.0
60	2022/03/24	14:34:01	121.43	23.34	28.0	3.53	62.2	37.0	69.0	90.0	217.1	21.0	90.0
61	2022/03/25	01:08:29	121.38	23.39	14.0	3.85	77.7	24.7	86.6	44.7	291.3	45.4	175.2
62	2022/03/27	00:15:03	121.47	23.39	26.0	3.88	80.0	17.2	55.8	72.6	226.3	37.9	113.7
63	2022/03/28	09:00:27	121.33	23.11	18.0	4.48	85.9	22.6	56.9	74.9	228.8	36.1	111.7
64	2022/03/28	20:23:56	122.24	23.92	26.0	4.48	73.5	63.4	75.8	49.1	317.5	42.9	158.8
65	2022/03/29	09:06:05	122.28	23.92	22.0	4.10	77.6	73.0	76.8	62.1	319.6	30.6	153.4

66	2022/03/29	10:56:57	121.47	23.48	26.0	3.79	75.7	17.7	60.6	70.4	233.6	34.8	120.7
67	2022/03/30	18:39:05	121.38	23.43	16.0	3.51	76.3	194.7	74.5	-76.0	331.6	20.7	228.8
68	2022/03/31	10:56:02	121.38	23.30	16.0	3.55	60.5	25.4	73.6	77.6	243.4	20.4	126.2
69	2022/04/01	13:29:01	122.24	24.74	8.0	4.00	66.8	147.8	68.9	-3.8	239.2	86.4	201.2
70	2022/04/02	15:42:22	121.51	22.84	14.0	4.14	71.9	45.0	51.5	142.0	160.9	61.2	45.3
71	2022/04/04	01:50:47	120.61	23.11	10.0	4.22	88.4	339.5	81.8	10.4	248.0	79.7	171.7
72	2022/04/05	17:35:34	122.06	24.87	16.0	3.45	64.1	170.9	32.4	125.1	311.1	64.0	69.9
73	2022/04/07	03:41:01	121.33	23.11	20.0	4.49	86.7	18.5	51.6	91.6	196.0	38.5	88.0
74	2022/04/07	23:36:18	120.97	21.67	14.0	5.86	89.7	52.4	45.0	138.8	174.1	62.2	53.0
75	2022/04/09	12:34:02	121.02	21.63	14.0	4.09	81.4	33.8	36.0	129.7	168.0	63.1	65.1
76	2022/04/09	15:45:57	121.69	24.65	10.0	3.61	73.4	241.8	49.6	-65.9	27.1	45.9	244.3
77	2022/04/11	05:17:56	121.51	23.43	30.0	4.10	83.7	29.2	45.8	72.5	233.5	46.8	107.2
78	2022/04/12	04:14:40	120.66	22.93	20.0	4.07	82.1	174.6	73.5	102.6	316.5	20.6	53.7
79	2022/04/12	21:32:22	121.79	24.01	10.0	3.84	71.7	45.9	86.5	100.3	154.7	10.9	19.1
80	2022/04/13	09:28:01	121.92	24.47	16.0	3.72	74.5	178.5	47.6	136.9	300.8	59.7	51.3
81	2022/04/14	19:06:59	121.47	23.75	6.0	4.30	65.4	34.4	47.4	84.7	222.2	42.8	95.7
82	2022/04/17	02:44:11	122.32	23.97	26.0	3.92	65.7	55.1	75.1	40.6	312.6	51.0	160.7
83	2022/04/18	11:38:38	120.89	21.32	20.0	5.29	68.4	91.2	41.8	102.4	254.8	49.3	79.1
84	2022/04/22	01:37:44	121.56	23.57	30.0	3.96	81.4	195.8	66.2	-74.7	341.7	28.0	239.1
85	2022/04/23	07:31:37	121.61	23.97	39.0	4.08	80.4	121.2	57.7	-59.7	253.6	43.1	231.4
86	2022/04/23	17:53:48	121.83	24.69	66.0	4.28	90.6	229.8	65.6	161.2	327.8	72.9	25.6
87	2022/04/25	08:18:25	121.47	23.43	20.0	3.40	66.4	22.4	35.2	83.4	210.5	55.1	94.7
88	2022/04/25	21:30:36	121.47	23.30	33.0	4.40	92.3	239.3	44.9	139.9	0.1	62.9	52.6
89	2022/04/28	00:42:45	120.89	23.16	8.0	3.77	73.0	341.5	70.6	-33.5	83.8	58.6	202.8
90	2022/05/02	18:43:14	121.69	24.10	30.0	4.40	87.7	21.2	77.6	74.1	254.3	20.1	141.4
91	2022/05/06	22:46:35	120.71	23.11	10.0	3.27	68.8	360.0	88.0	-4.9	90.1	85.1	182.0
92	2022/05/07	23:23:47	121.51	23.43	30.0	4.14	87.4	340.9	57.2	39.9	226.5	57.4	140.0
93	2022/05/09	06:23:06	122.55	24.01	30.0	6.19	90.9	312.9	40.9	163.8	55.3	79.5	50.2
94	2022/05/09	07:45:54	122.60	23.97	30.0	5.07	81.6	302.0	26.5	160.6	49.5	81.5	64.9
95	2022/05/09	14:09:21	122.55	24.06	33.0	4.25	84.7	58.7	64.5	47.0	303.9	48.7	145.0
96	2022/05/09	15:35:35	122.19	24.92	120.0	4.52	86.4	323.2	87.7	-83.6	72.6	6.8	199.6
97	2022/05/11	17:14:50	121.51	23.48	28.0	3.71	76.3	34.2	64.5	90.1	213.9	25.5	89.7
98	2022/05/12	00:41:25	122.06	24.87	8.0	3.32	72.4	251.6	32.3	-67.1	45.0	60.5	256.2
99	2022/05/12	07:58:46	121.51	23.48	30.0	3.61	68.2	3.5	58.3	68.8	219.9	37.5	120.3

100	2022/05/12	11:45:40	122.68	23.88	28.0	4.36	77.8	61.5	66.1	14.0	325.7	77.2	155.4
101	2022/05/12	14:47:11	121.51	23.70	12.0	3.86	67.0	199.2	58.5	83.3	31.8	32.1	100.8
102	2022/05/13	10:28:31	122.01	24.87	8.0	3.55	68.6	56.4	53.1	-85.2	228.4	37.1	263.7
103	2022/05/13	23:23:18	121.56	21.94	4.0	3.25	63.8	99.1	61.7	-65.6	235.4	36.7	232.5
104	2022/05/20	22:00:51	122.42	24.87	8.0	3.68	71.3	275.1	55.9	-69.1	60.8	39.3	242.2
105	2022/05/16	23:30:18	122.01	24.87	8.0	3.71	74.5	55.2	56.8	-89.7	234.6	33.2	269.5
106	2022/05/20	22:00:51	122.42	24.87	8.0	3.68	71.3	275.1	55.9	-69.1	60.8	39.3	242.2
107	2022/05/23	15:30:33	120.89	23.16	10.0	3.26	66.0	337.0	70.3	-37.1	81.2	55.4	204.2
108	2022/05/24	07:37:38	122.55	23.97	28.0	4.33	82.1	318.2	34.4	172.2	54.6	85.6	55.8
109	2022/05/25	20:58:21	120.89	23.02	6.0	4.15	76.9	148.7	46.4	-76.7	309.8	45.2	256.5
110	2022/05/27	19:39:57	121.07	23.20	16.0	3.44	68.6	187.4	71.7	-15.4	282.3	75.4	199.0
111	2022/06/01	00:35:44	121.15	23.52	10.0	3.32	62.5	214.7	57.7	-50.3	337.4	49.4	224.7
112	2022/06/01	08:16:48	121.47	23.39	22.0	3.77	77.2	25.5	52.5	79.2	222.9	38.8	103.8
113	2022/06/01	11:19:56	122.46	24.83	2.0	3.82	74.9	43.3	45.6	-89.9	223.0	44.4	269.9
114	2022/06/02	06:03:19	122.64	23.70	28.0	4.01	73.2	64.5	79.5	52.9	321.0	38.3	163.0
115	2022/06/02	21:09:04	121.51	23.43	30.0	4.12	87.1	228.1	59.4	151.3	333.7	65.6	34.0
116	2022/06/04	12:11:15	120.97	21.36	16.0	4.29	60.0	82.5	47.6	104.7	241.2	44.4	74.5
117	2022/06/07	08:31:01	122.06	24.87	8.0	3.30	62.9	99.4	82.1	-11.7	191.0	78.5	188.1
118	2022/06/08	06:22:04	123.00	24.33	42.0	4.12	84.8	257.3	35.5	88.7	78.9	54.5	90.9
119	2022/06/10	06:03:39	121.47	23.30	28.0	3.87	86.7	357.6	46.7	66.2	210.4	48.3	113.2
120	2022/06/16	11:00:56	121.61	24.65	60.0	3.84	78.7	91.6	88.6	100.0	189.3	10.0	7.8
121	2022/06/18	02:57:32	121.38	23.25	18.0	4.06	85.8	11.4	67.8	69.4	236.3	29.9	130.7
122	2022/06/18	16:10:29	121.38	23.25	20.0	3.47	78.3	38.4	67.8	111.4	172.3	30.4	48.2
123	2022/06/19	18:38:39	121.15	23.02	12.0	3.36	68.6	70.9	38.4	129.1	204.9	61.2	63.4
124	2022/06/20	01:05:10	121.47	23.66	8.0	5.95	90.1	59.8	54.1	105.7	214.1	38.8	69.5
125	2022/06/20	01:39:43	121.47	23.75	12.0	4.54	66.2	67.4	60.9	116.2	202.0	38.4	51.6
126	2022/06/20	04:15:14	121.47	23.66	8.0	4.11	64.9	71.9	33.5	130.0	206.7	65.0	67.0
127	2022/06/20	13:31:25	122.06	24.87	8.0	3.52	72.2	281.9	78.2	10.9	189.7	79.3	168.0
128	2022/06/21	01:30:06	121.47	23.61	12.0	3.72	60.4	219.2	88.5	-55.6	311.4	34.5	182.7
129	2022/06/21	12:01:39	121.47	23.70	12.0	3.58	66.5	33.0	80.2	61.6	285.7	29.9	160.1
130	2022/06/21	12:05:31	121.47	23.70	14.0	3.87	70.4	206.5	88.2	-69.6	301.2	20.4	185.1
131	2022/06/21	14:55:42	122.91	25.18	26.0	4.05	62.2	299.5	43.6	136.8	63.7	61.8	55.2
132	2022/06/21	18:52:07	121.43	23.66	16.0	3.46	72.8	16.9	54.2	85.7	204.2	36.0	96.0
133	2022/06/21	19:08:06	121.51	23.75	16.0	3.42	62.7	68.1	54.1	115.7	208.8	43.1	59.1

134	2022/06/22	16:39:10	121.96	24.83	8.0	3.27	76.1	263.7	27.4	-68.0	59.3	64.7	259.0
135	2022/06/22	21:02:44	121.51	23.61	12.0	4.13	64.7	224.8	86.0	-57.7	321.1	32.5	187.5
136	2022/06/23	20:21:22	121.47	23.61	2.0	4.14	64.9	61.3	58.6	89.7	241.9	31.4	90.6
137	2022/06/23	21:58:56	122.37	24.01	33.0	4.40	73.2	55.6	63.6	41.5	304.1	53.6	146.5
138	2022/06/23	22:32:22	122.50	24.15	33.0	5.19	89.1	61.9	63.7	53.7	300.8	43.8	140.2
139	2022/06/24	05:47:56	121.47	23.66	14.0	3.54	64.3	30.2	44.5	103.6	191.5	47.1	77.0
140	2022/06/24	17:44:43	122.86	24.33	42.0	4.09	90.8	142.8	63.4	43.5	29.8	52.0	145.4
141	2022/06/25	02:27:20	121.43	23.66	14.0	4.77	84.1	25.6	56.4	89.1	207.2	33.6	91.3
142	2022/06/25	09:38:19	121.43	23.61	14.0	3.39	67.2	50.7	62.5	106.4	198.2	31.7	61.5
143	2022/06/25	13:34:36	121.43	23.61	14.0	4.88	84.5	23.1	49.1	82.2	215.0	41.5	98.9
144	2022/06/25	14:08:56	121.43	23.61	16.0	3.61	65.2	13.7	56.7	72.9	223.0	37.0	114.2
145	2022/06/25	16:07:50	121.43	23.66	16.0	3.84	74.6	19.8	55.6	90.9	198.3	34.4	88.7
146	2022/06/25	16:50:04	121.43	23.66	16.0	3.37	64.1	9.1	66.7	89.4	190.6	23.3	91.4
147	2022/06/26	00:34:34	121.43	23.61	16.0	3.62	69.9	10.7	49.6	76.2	211.5	42.3	105.7
148	2022/06/26	00:48:20	121.43	23.61	16.0	3.48	65.6	25.2	39.6	94.8	199.0	50.6	86.0
149	2022/06/26	04:28:42	121.47	23.61	16.0	3.70	70.8	18.4	40.0	91.9	195.9	50.0	88.4
150	2022/06/26	16:46:02	121.51	23.75	12.0	4.14	66.9	43.4	79.3	70.6	285.7	22.0	150.4
151	2022/07/01	13:32:10	121.47	22.12	33.0	4.53	71.6	345.8	70.1	30.7	244.4	61.3	157.2
152	2022/07/07	19:57:52	121.96	24.78	6.0	3.63	78.4	262.6	27.7	-78.9	70.1	62.9	264.3
153	2022/07/08	00:01:46	122.91	25.18	26.0	4.48	65.7	291.6	44.0	117.0	76.2	51.8	66.3
154	2022/07/08	11:57:49	121.92	24.83	8.0	4.26	80.6	99.9	59.2	-49.6	220.9	49.2	222.6
155	2022/07/08	12:23:42	121.96	24.78	2.0	3.29	55.5	55.5	26.7	-58.9	201.5	67.4	255.5
156	2022/07/09	03:59:52	121.96	24.83	12.0	3.83	70.2	81.7	59.1	18.1	342.1	74.5	147.8
157	2022/07/09	17:32:29	121.38	23.16	36.0	3.91	81.5	145.6	52.4	-40.7	263.2	58.9	225.4
158	2022/07/12	11:34:45	122.37	24.06	33.0	3.65	67.5	55.1	60.1	45.6	298.1	51.7	140.6
159	2022/07/14	01:51:17	121.96	24.83	2.0	3.89	82.0	74.8	66.5	-80.6	232.3	25.2	249.4
160	2022/07/14	01:53:12	121.96	24.83	8.0	3.50	66.4	99.6	89.6	-49.9	190.1	40.1	180.7
161	2022/07/14	02:10:19	122.01	24.83	6.0	4.11	82.2	65.1	62.0	-77.7	220.1	30.4	248.1
162	2022/07/14	08:42:54	121.96	24.83	2.0	3.60	75.8	53.3	56.8	-89.3	231.9	33.2	268.9
163	2022/07/16	06:21:52	121.96	24.83	4.0	3.41	65.9	241.0	42.4	-81.4	49.4	48.2	262.2
164	2022/07/19	02:39:59	121.33	23.25	12.0	4.13	76.6	42.7	67.1	105.6	187.0	27.4	57.5
165	2022/07/24	00:32:36	121.47	23.30	28.0	4.93	93.0	4.8	55.7	66.3	222.7	40.9	120.4
166	2022/07/24	18:16:36	121.43	23.39	16.0	4.01	86.5	19.3	64.0	79.1	223.0	28.1	111.1
167	2022/07/24	23:44:31	120.97	24.47	10.0	3.94	80.6	17.4	85.1	-8.3	108.1	81.8	184.9

168	2022/07/25	23:47:25	120.93	22.31	26.0	3.54	69.9	356.3	22.1	-14.6	99.9	84.6	248.6
169	2022/07/28	00:16:16	121.38	22.98	45.0	4.71	90.4	145.2	67.8	-11.1	239.4	79.7	202.6
170	2022/07/28	14:40:43	121.69	24.06	33.0	3.63	67.6	13.1	86.1	68.9	273.2	21.4	169.4
171	2022/08/01	06:20:28	122.46	23.92	28.0	3.94	70.8	318.0	40.2	148.6	73.0	70.4	54.2
172	2022/08/15	12:44:38	121.74	24.42	30.0	3.70	77.2	186.5	88.6	-63.3	279.3	26.8	183.1
173	2022/08/15	21:21:54	121.92	24.83	10.0	3.39	72.3	283.8	43.3	-40.1	45.3	63.8	234.2
174	2022/08/17	15:43:09	122.55	24.06	36.0	4.00	83.8	305.9	50.1	144.3	60.6	63.4	45.8
175	2022/08/18	09:28:30	122.46	23.92	28.0	4.10	79.9	59.7	79.0	50.6	316.7	40.6	163.0
176	2022/08/18	10:44:23	121.74	24.10	14.0	3.74	87.5	218.4	88.0	-82.3	323.0	8.0	194.7
177	2022/08/18	10:47:32	121.79	24.10	14.0	3.87	87.5	209.0	84.0	-77.5	324.3	13.8	205.9
178	2022/08/18	14:12:32	121.74	24.10	14.0	3.53	85.8	217.0	85.7	-86.4	356.9	5.7	230.0
179	2022/08/19	11:25:57	121.92	24.83	10.0	3.55	73.2	250.0	38.5	-83.8	62.1	51.8	265.1
180	2022/08/20	04:07:50	122.32	24.10	30.0	4.81	85.7	65.9	74.3	46.6	319.9	45.6	157.7
181	2022/08/23	13:02:23	121.43	22.44	28.0	3.94	71.6	348.8	59.7	-2.2	79.9	88.1	210.3
182	2022/08/29	11:39:22	120.71	21.76	30.0	3.60	61.2	338.2	49.7	-88.0	155.0	40.3	267.6
183	2022/09/01	07:01:57	121.38	23.11	33.0	4.19	65.5	133.9	52.5	-35.3	247.2	62.8	223.2
184	2022/09/07	04:50:45	121.92	24.83	8.0	4.24	80.7	64.4	41.7	-73.9	223.3	50.3	256.1
185	2022/09/14	01:35:52	121.47	22.49	24.0	4.73	80.0	229.6	59.9	126.9	353.4	46.2	44.0
186	2022/09/17	08:45:57	122.50	23.83	28.0	3.82	61.1	60.5	82.9	34.4	325.6	55.9	171.4
187	2022/09/17	13:41:23	121.15	23.07	14.0	6.55	89.0	101.3	59.6	167.3	197.8	79.1	31.0
188	2022/09/17	14:35:14	121.20	23.11	12.0	4.88	74.6	53.1	62.8	91.1	230.6	27.2	87.8
189	2022/09/17	14:45:30	121.25	23.16	10.0	5.50	88.4	99.5	86.5	155.3	191.1	65.3	3.8
190	2022/09/17	18:03:31	121.29	23.11	18.0	4.69	85.2	16.2	58.8	74.3	224.8	34.6	114.1
191	2022/09/17	19:25:57	122.73	23.97	28.0	4.05	86.3	52.1	74.2	51.3	303.3	41.4	155.6
192	2022/09/17	21:41:44	121.29	23.11	16.0	4.12	80.1	23.0	58.0	80.0	221.4	33.4	105.5
193	2022/09/17	22:05:51	121.25	23.11	14.0	3.96	67.9	176.6	58.0	69.1	32.3	37.6	119.7
194	2022/09/18	00:48:39	121.25	23.07	12.0	3.55	61.0	40.2	52.9	154.8	146.0	70.2	39.9
195	2022/09/18	01:52:35	121.29	23.07	16.0	4.80	85.5	10.5	58.6	64.9	232.4	39.4	124.8
196	2022/09/18	02:00:11	121.29	23.11	16.0	4.61	84.3	20.2	58.4	81.8	215.5	32.5	103.0
197	2022/09/18	03:49:21	121.29	23.07	16.0	4.40	83.0	14.8	59.8	72.3	227.2	34.5	117.6
198	2022/09/18	04:07:41	121.29	23.07	16.0	4.10	79.9	15.2	56.4	67.9	231.5	39.5	119.5
199	2022/09/18	04:10:54	121.15	22.93	12.0	4.15	64.6	121.8	18.6	-28.0	238.6	81.4	253.4
200	2022/09/18	05:19:20	121.20	23.16	14.0	5.65	91.8	103.8	56.8	166.5	201.3	78.8	34.0
201	2022/09/18	05:54:40	121.25	23.16	14.0	4.28	73.6	63.2	80.4	110.2	177.6	22.3	26.1

202	2022/09/18	06:32:03	121.20	23.16	12.0	5.25	89.0	97.7	59.5	154.2	201.5	68.0	33.2
203	2022/09/18	06:44:25	121.29	23.25	8.0	6.93	88.1	84.4	50.9	134.6	206.9	56.5	49.2
204	2022/09/18	09:40:00	121.29	23.25	10.0	5.73	91.0	32.7	65.9	111.0	169.6	31.6	51.4
205	2022/09/18	10:57:14	121.29	23.39	2.0	3.91	89.7	184.7	70.8	87.0	13.8	19.4	98.6
206	2022/09/18	11:27:31	121.20	23.16	12.0	4.01	74.9	283.4	83.8	60.8	182.5	29.8	167.5
207	2022/09/18	12:11:05	121.20	23.16	10.0	3.76	74.6	95.9	82.5	-46.3	193.7	44.2	190.8
208	2022/09/18	12:33:35	121.38	23.39	16.0	3.96	93.5	43.8	45.0	110.8	195.6	48.6	70.4
209	2022/09/18	12:38:44	121.38	23.30	16.0	3.70	86.6	213.7	64.2	104.0	3.9	29.1	63.4
210	2022/09/18	12:44:37	121.20	23.11	12.0	3.82	72.7	96.8	76.4	-47.8	201.4	43.9	199.8
211	2022/09/18	13:07:24	121.33	23.34	12.0	3.43	78.9	195.2	50.1	107.3	349.3	42.9	70.4
212	2022/09/18	15:34:07	121.15	22.93	10.0	3.55	81.4	173.8	79.3	68.0	59.2	24.3	153.3
213	2022/09/18	15:39:32	121.33	23.48	16.0	3.81	84.4	198.2	63.2	48.5	81.3	48.1	142.8
214	2022/09/18	18:21:09	121.25	23.11	14.0	4.02	70.7	59.6	22.4	130.8	196.5	73.2	74.9
215	2022/09/18	18:41:48	121.25	23.11	14.0	3.75	64.5	190.0	81.6	82.9	50.5	11.0	130.0
216	2022/09/18	19:12:10	123.00	23.70	33.0	4.10	74.1	342.4	48.8	-7.0	77.1	84.7	221.4
217	2022/09/19	00:24:34	121.38	23.39	14.0	3.46	79.1	196.1	57.6	87.6	20.6	32.5	93.8
218	2022/09/19	02:07:45	121.33	23.43	14.0	5.65	91.5	77.8	40.6	143.1	197.5	67.0	55.5
219	2022/09/19	07:03:36	121.43	23.30	22.0	3.75	66.4	351.2	51.0	43.4	230.4	57.7	131.9
220	2022/09/19	09:51:44	121.33	23.48	10.0	3.39	65.3	71.6	40.3	131.2	202.7	60.9	60.9
221	2022/09/19	10:34:16	121.38	23.39	14.0	3.30	61.3	34.7	21.5	114.7	188.3	70.6	80.6
222	2022/09/19	11:30:33	121.25	23.30	24.0	4.01	81.5	22.3	87.1	-26.2	113.7	63.8	183.2
223	2022/09/20	01:23:31	121.43	23.30	20.0	3.87	73.2	23.5	53.0	69.2	235.8	41.8	115.2
224	2022/09/21	01:13:44	121.15	23.07	22.0	4.28	84.4	22.1	83.9	-29.8	115.6	60.4	187.1
225	2022/09/21	13:06:31	121.11	22.93	12.0	3.53	60.9	198.0	68.5	15.4	102.3	75.7	157.8
226	2022/09/21	17:50:43	121.25	22.93	18.0	3.42	62.1	118.3	79.0	-84.0	269.6	12.5	241.9
227	2022/09/21	19:35:30	121.51	23.52	22.0	3.94	84.0	17.5	74.0	82.6	222.7	17.6	114.1
228	2022/09/22	01:04:46	121.25	23.30	18.0	3.95	73.0	102.0	56.3	165.2	200.4	77.7	34.6
229	2022/09/22	14:15:50	121.29	22.98	4.0	4.04	72.9	321.2	75.3	15.8	227.0	74.7	164.7
230	2022/09/22	15:21:12	121.20	22.93	12.0	3.48	79.3	159.2	72.4	35.9	56.9	56.0	158.7
231	2022/09/23	01:57:20	121.20	22.89	8.0	3.73	80.5	79.2	58.4	137.3	195.0	54.7	39.9
232	2022/09/27	11:11:10	121.25	22.98	8.0	4.11	85.6	344.4	87.6	-39.7	76.3	50.3	183.1
233	2022/09/27	16:59:34	121.25	22.93	14.0	3.49	70.9	75.9	86.1	172.8	166.4	82.8	4.0
234	2022/09/29	12:36:15	121.29	22.93	22.0	3.67	71.1	22.4	53.0	76.4	224.3	39.1	107.4
235	2022/09/29	18:33:36	121.83	24.33	20.0	3.56	69.0	21.7	71.8	72.9	246.2	24.7	131.8

236	2022/09/29	20:21:56	121.83	24.33	22.0	3.57	69.2	16.4	76.5	66.6	258.0	26.9	148.8
237	2022/09/30	06:04:07	121.15	23.16	10.0	3.61	70.8	284.6	82.0	48.6	185.6	42.0	168.0
238	2022/09/30	13:17:59	121.29	22.89	20.0	3.81	75.2	19.0	54.0	74.0	224.9	39.0	110.7
239	2022/09/30	14:37:22	121.29	22.89	20.0	4.52	83.7	15.6	57.3	74.9	222.2	35.6	112.1
240	2022/10/02	03:47:18	122.55	23.92	28.0	4.24	80.4	304.7	23.4	150.8	61.8	78.8	69.3
241	2022/10/02	07:35:25	121.29	22.89	18.0	3.55	74.1	215.2	54.2	110.2	3.1	40.4	64.4
242	2022/10/02	16:44:48	121.20	22.98	8.0	3.23	75.9	163.8	74.8	5.7	72.3	84.5	164.8
243	2022/10/02	20:25:23	121.47	23.48	24.0	4.74	90.0	3.8	68.9	55.6	246.0	39.7	145.6
244	2022/10/03	14:33:55	121.25	23.30	18.0	3.46	74.2	101.6	56.7	168.7	197.9	80.6	33.8
245	2022/10/03	14:41:22	121.33	23.48	14.0	3.39	85.8	73.3	44.6	124.0	209.9	54.4	61.2
246	2022/10/03	17:47:17	121.25	22.93	10.0	3.78	76.0	78.0	87.5	177.1	168.2	87.1	2.5
247	2022/10/06	16:37:57	122.78	24.78	39.0	4.54	61.3	55.3	35.5	113.9	206.8	58.0	73.9
248	2022/10/07	05:13:24	121.33	23.48	16.0	4.14	82.0	81.5	38.9	146.9	198.4	70.0	56.0
249	2022/10/07	14:06:55	121.33	23.48	20.0	4.30	92.2	194.9	60.3	50.8	73.6	47.7	137.9
250	2022/10/09	20:03:41	121.25	23.30	18.0	3.88	65.8	198.8	80.4	34.1	102.4	56.5	168.4
251	2022/10/10	03:37:31	121.33	22.93	6.0	4.28	75.3	58.7	89.2	179.8	148.7	89.8	0.8
252	2022/10/10	12:17:52	121.56	23.61	33.0	4.84	91.4	23.4	65.0	73.0	239.3	29.9	122.1
253	2022/10/10	19:24:44	122.24	24.01	28.0	5.71	83.8	318.5	41.0	168.0	57.6	82.2	49.6
254	2022/10/13	12:58:17	121.51	23.75	12.0	4.09	67.7	15.8	81.6	76.6	254.3	15.7	147.4
255	2022/10/22	04:38:11	121.25	23.30	24.0	4.02	80.5	23.3	85.5	-27.1	115.6	63.0	185.1
256	2022/10/23	23:14:53	122.24	23.92	26.0	4.14	67.9	62.9	81.1	44.9	324.1	45.8	167.5
257	2022/10/27	09:35:51	121.20	23.16	22.0	3.79	64.5	21.1	88.9	-21.8	111.6	68.2	181.2
258	2022/10/28	15:30:44	122.01	24.65	60.0	4.76	88.7	54.7	34.5	142.7	176.8	69.9	61.3
259	2022/10/31	08:48:28	121.25	22.89	8.0	4.98	86.3	149.3	80.7	-1.0	239.5	89.0	189.3
260	2022/10/31	12:31:16	121.15	22.84	2.0	3.76	58.1	285.7	14.5	102.0	93.2	75.8	86.9
261	2022/11/01	08:30:09	122.60	24.78	126.0	5.15	88.3	111.1	79.2	103.5	239.1	17.2	39.3
262	2022/11/02	17:35:05	121.25	23.70	14.0	3.71	65.3	148.4	58.0	-79.5	309.1	33.5	253.7
263	2022/11/03	05:43:01	121.25	22.93	10.0	3.66	68.6	157.3	82.0	-4.3	247.8	85.8	188.0
264	2022/11/03	07:50:09	121.20	22.89	10.0	3.68	78.3	128.8	64.7	-40.1	238.6	54.4	211.7
265	2022/11/06	00:10:13	121.65	21.45	150.0	4.72	63.5	344.5	78.6	-6.0	75.6	84.1	191.5
266	2022/11/09	07:42:08	121.25	22.89	4.0	4.61	82.8	146.5	76.8	2.8	55.8	87.3	166.8
267	2022/11/09	18:53:16	121.29	22.89	10.0	3.31	70.8	143.8	66.1	-4.6	235.7	85.8	203.9
268	2022/11/11	09:50:59	122.46	23.92	28.0	3.73	68.1	59.7	78.9	48.3	317.5	42.9	163.5
269	2022/11/12	01:20:51	121.56	21.41	28.0	4.40	68.4	147.7	55.5	94.8	319.2	34.8	83.0

270	2022/11/12	20:32:59	121.74	24.06	36.0	3.66	68.0	339.8	80.1	-1.5	70.0	88.6	189.9
271	2022/11/13	01:47:46	121.07	22.44	14.0	5.13	83.7	171.5	26.4	-5.2	266.2	87.7	243.7
272	2022/11/13	14:09:09	121.02	22.49	12.0	4.20	77.7	165.4	32.2	-22.2	274.5	78.4	239.8
273	2022/11/14	13:21:06	121.15	23.11	22.0	3.75	74.0	18.9	89.1	-27.9	109.3	62.2	181.1
274	2022/11/14	16:57:27	121.33	22.58	33.0	3.74	66.7	142.9	77.4	-23.6	238.3	67.1	193.7
275	2022/11/15	00:07:01	122.06	24.65	60.0	3.92	68.4	44.3	30.0	132.4	177.8	68.3	68.8
276	2022/11/15	03:43:53	121.07	22.44	12.0	4.50	64.7	57.7	36.4	-76.2	220.8	54.8	260.0
277	2022/11/15	08:05:01	121.25	23.30	24.0	3.51	69.6	104.6	62.8	171.1	198.7	82.1	27.5
278	2022/11/15	11:53:23	121.02	22.44	10.0	4.73	68.9	46.4	41.7	-86.9	222.2	48.3	267.2
279	2022/11/15	12:36:16	121.47	23.34	33.0	4.00	86.7	10.1	54.8	63.0	231.6	43.2	122.8
280	2022/11/15	14:55:09	121.07	22.40	12.0	3.60	61.2	74.6	28.9	-56.4	217.4	66.3	253.0
281	2022/11/15	15:00:08	121.07	22.40	12.0	3.56	64.4	94.1	31.2	-44.7	224.4	68.6	246.7
282	2022/11/16	01:09:35	121.15	23.07	22.0	4.16	85.4	22.8	84.4	-29.1	115.9	61.0	186.4
283	2022/11/16	15:02:09	121.07	22.44	10.0	4.11	63.8	76.5	43.5	-65.8	224.8	51.1	248.8
284	2022/11/16	15:07:44	121.07	22.44	10.0	4.75	66.0	88.4	33.1	-54.1	227.5	63.7	249.1
285	2022/11/16	18:18:27	122.50	24.01	30.0	3.75	83.3	299.6	34.4	124.0	80.4	62.1	69.0
286	2022/11/16	23:26:03	121.07	22.93	14.0	3.35	61.0	197.5	75.2	25.8	100.5	65.2	163.7
287	2022/11/17	04:07:55	122.46	24.06	30.0	4.00	85.6	290.4	33.6	116.3	79.7	60.2	73.6
288	2022/11/18	22:25:25	121.15	24.19	66.0	3.83	65.0	319.4	75.2	-40.5	61.7	51.1	199.1
289	2022/11/19	11:45:58	121.02	22.31	20.0	3.89	74.7	120.0	15.0	-16.4	225.9	85.8	255.6
290	2022/11/20	01:49:42	121.96	24.69	66.0	4.80	89.3	68.6	34.0	164.3	171.7	81.3	57.0
291	2022/11/21	15:27:08	121.69	24.60	180.0	4.58	61.3	288.9	84.7	-19.2	20.8	70.9	185.6
292	2022/11/22	21:55:43	121.33	23.48	12.0	3.36	77.3	81.2	45.6	128.5	212.6	56.0	57.6
293	2022/11/26	00:57:04	122.28	24.24	39.0	3.77	67.2	170.8	49.0	92.4	347.1	41.0	87.2
294	2022/11/26	17:38:04	121.65	23.88	45.0	4.83	90.8	20.7	85.1	71.0	276.8	19.6	165.3
295	2022/11/26	19:09:55	122.32	24.10	26.0	4.37	79.0	231.5	72.7	-69.1	359.4	26.9	221.2
296	2022/11/29	02:43:22	121.61	23.88	42.0	3.75	64.9	176.4	53.7	-14.9	275.3	78.0	217.2
297	2022/12/07	16:54:28	121.61	23.79	39.0	5.33	93.2	4.1	66.9	58.5	241.4	38.4	140.7
298	2022/12/12	15:52:34	121.29	22.89	8.0	3.76	73.6	141.9	61.0	-1.9	232.8	88.3	209.0
299	2022/12/14	22:01:51	122.06	24.87	6.0	3.69	86.0	262.9	29.7	-42.1	31.0	70.6	247.1
300	2022/12/14	22:54:12	121.25	23.43	30.0	4.13	86.3	19.3	75.2	-36.8	120.1	54.7	198.3
301	2022/12/15	04:03:20	121.79	23.79	16.0	5.98	91.5	30.8	50.3	78.5	228.4	41.1	103.5
302	2022/12/16	00:35:17	120.66	22.84	22.0	3.74	74.9	55.7	33.3	137.0	183.6	68.0	64.3
303	2022/12/16	17:38:27	121.51	23.52	14.0	3.68	64.8	200.9	69.1	91.8	15.8	20.9	85.2

304	2022/12/22	04:36:33	120.97	22.58	10.0	4.68	82.6	177.4	41.9	-5.0	271.1	86.7	228.2
305	2022/12/23	21:17:59	121.20	23.16	22.0	4.86	87.5	20.1	87.8	-21.0	110.9	69.0	182.3
306	2022/12/26	22:56:22	122.55	23.70	26.0	4.67	74.6	61.0	76.5	48.5	316.2	43.3	160.1
307	2022/12/29	13:43:38	122.73	23.92	28.0	4.07	77.8	59.7	71.0	52.1	307.0	41.8	150.8
308	2023/01/05	02:10:35	122.01	24.87	4.0	3.69	73.1	67.9	61.2	-83.8	235.3	29.4	258.9
309	2023/01/05	04:59:29	121.56	23.25	45.0	4.37	84.3	354.2	45.0	64.1	208.7	50.5	113.6
310	2023/01/05	17:11:37	122.06	24.87	4.0	4.11	84.5	235.5	33.1	-84.9	49.4	57.1	266.7
311	2023/01/05	18:02:54	122.01	24.92	4.0	4.13	86.0	245.2	30.6	-55.6	26.7	65.1	251.5
312	2023/01/05	23:06:16	121.96	24.92	2.0	3.50	69.4	56.0	67.0	-77.9	207.3	25.8	243.7
313	2023/01/07	11:21:27	121.29	23.57	20.0	4.17	63.5	75.1	42.6	139.3	197.4	63.8	55.1
314	2023/01/08	17:13:18	120.57	23.11	12.0	3.66	70.6	187.6	36.9	85.2	13.6	53.2	93.6
315	2023/01/09	10:07:09	122.46	23.97	28.0	3.78	79.4	293.2	36.2	122.1	75.4	60.0	68.8
316	2023/01/11	04:42:10	121.43	23.20	28.0	4.22	90.3	19.0	50.2	73.4	224.0	42.6	108.9
317	2023/01/11	14:50:53	120.71	23.16	10.0	3.20	63.3	327.1	69.7	-12.5	61.5	78.3	200.7
318	2023/01/12	05:15:53	120.66	22.84	26.0	4.03	82.7	59.7	36.3	140.3	183.4	67.8	60.5
319	2023/01/13	15:02:39	122.32	24.01	26.0	4.61	81.7	257.7	12.7	81.2	86.7	77.5	92.0
320	2023/01/13	18:56:01	122.01	24.92	6.0	3.38	74.1	281.4	45.8	4.7	188.1	86.6	135.7
321	2023/01/16	14:03:01	122.42	23.92	24.0	4.42	83.4	158.7	3.1	-21.1	269.8	88.9	267.1
322	2023/01/22	13:47:46	122.42	24.06	14.0	3.80	80.2	226.1	72.4	-1.8	316.6	88.3	197.7
323	2023/01/22	14:40:18	122.42	24.06	14.0	3.54	66.9	225.9	70.6	-10.2	319.3	80.4	199.7
324	2023/02/06	20:20:17	121.79	24.28	28.0	4.59	84.9	19.1	85.3	65.6	278.9	24.8	168.8
325	2023/02/08	10:50:00	121.56	23.39	39.0	5.01	90.6	4.1	63.0	54.8	241.4	43.3	138.5
326	2023/02/10	00:07:59	121.92	24.60	12.0	3.34	60.5	85.9	72.3	-86.2	253.5	18.1	258.2
327	2023/02/11	11:35:49	121.56	23.43	36.0	4.62	91.0	254.5	61.4	155.3	356.9	68.5	30.9
328	2023/02/12	21:51:17	121.15	23.11	22.0	3.64	71.2	17.7	88.3	-24.5	108.5	65.6	181.9
329	2023/02/16	00:30:20	120.61	22.93	12.0	3.67	61.2	164.4	62.8	68.9	24.5	33.9	125.0
330	2023/02/16	09:59:25	122.14	24.83	14.0	3.70	68.0	271.4	78.0	3.6	180.6	86.5	168.0
331	2023/02/17	01:08:21	121.56	25.14	4.0	3.17	36.8	36.9	64.6	-71.0	178.1	31.4	235.5
332	2023/02/17	01:22:50	121.51	23.92	20.0	4.29	85.6	69.6	43.6	122.0	208.7	54.3	63.2
333	2023/02/18	15:49:10	120.79	23.70	24.0	4.44	75.9	343.9	64.4	34.0	237.6	59.7	150.0
334	2023/02/21	11:01:42	121.69	23.52	33.0	4.32	75.2	268.0	66.1	176.9	359.3	87.1	24.0
335	2023/02/22	21:18:45	121.74	23.97	8.0	4.05	73.3	38.6	79.0	81.9	255.4	13.7	126.0
336	2023/02/25	16:03:20	121.29	22.49	18.0	4.67	68.7	209.7	63.3	156.0	311.1	68.6	28.8
337	2023/02/27	19:30:59	121.38	23.20	20.0	3.66	71.0	26.6	53.2	86.6	212.4	36.9	94.6

338	2023/03/02	16:48:59	121.83	24.56	8.0	4.19	76.8	266.4	82.1	-2.1	356.6	87.9	187.9
339	2023/03/03	14:48:44	121.88	24.92	114.0	4.42	88.5	48.0	42.8	140.7	169.0	64.5	54.4
340	2023/03/03	17:57:32	122.19	24.06	26.0	4.48	75.3	64.7	74.7	53.6	315.0	39.1	155.3
341	2023/03/06	13:27:17	121.69	23.97	10.0	3.37	65.9	45.0	79.3	76.8	276.6	17.0	140.4
342	2023/03/06	14:34:02	121.83	24.51	10.0	3.49	68.0	93.1	36.4	-63.6	241.4	57.9	251.8
343	2023/03/08	18:32:21	122.64	23.88	28.0	4.28	80.1	307.7	28.3	170.3	46.2	85.4	62.1
344	2023/03/09	19:45:12	121.51	23.48	33.0	3.69	65.8	13.3	74.5	59.1	259.1	34.2	151.5
345	2023/03/15	09:05:05	122.06	24.87	6.0	3.45	73.5	252.6	40.1	-55.5	30.7	57.9	244.5
346	2023/03/15	09:15:37	122.01	24.92	6.0	3.17	66.3	47.3	73.6	-82.4	201.9	18.0	245.7
347	2023/03/21	01:45:20	121.33	23.66	8.0	5.19	89.0	139.4	39.8	-67.9	291.6	53.6	252.6
348	2023/03/22	15:43:04	121.33	23.66	8.0	4.16	77.8	125.0	52.9	-88.0	301.7	37.1	267.4
349	2023/03/22	21:51:03	121.29	23.66	10.0	4.03	77.2	138.4	56.2	-73.9	291.0	37.0	247.5
350	2023/03/26	04:43:51	121.47	21.36	39.0	4.34	76.6	29.2	41.1	53.8	253.3	58.0	117.2
351	2023/03/29	10:06:10	120.71	22.75	30.0	3.61	59.7	72.9	38.2	152.8	184.9	73.6	55.0
352	2023/03/30	06:44:30	121.33	23.48	18.0	3.49	69.1	76.6	43.2	134.9	202.9	61.0	56.5
353	2023/03/30	15:20:19	121.61	21.90	2.0	3.44	64.6	84.9	48.4	-87.3	260.9	41.7	267.0
354	2023/03/30	20:15:50	121.61	21.90	2.0	4.13	80.9	94.5	42.8	-80.6	261.8	47.9	261.4
355	2023/03/31	20:00:50	120.57	22.89	24.0	3.88	77.3	174.3	66.2	75.1	27.8	27.8	120.3
356	2023/03/31	20:02:17	120.97	24.42	6.0	3.77	74.9	170.8	74.5	-13.7	264.5	76.8	195.9
357	2023/04/05	18:09:15	121.47	23.30	22.0	3.76	84.3	10.1	31.1	62.4	221.5	62.7	105.6
358	2023/04/07	10:36:31	121.38	23.20	20.0	4.29	86.0	16.4	61.3	73.4	228.2	32.8	117.5
359	2023/04/08	12:14:50	121.47	23.43	36.0	4.17	78.9	330.7	70.9	-6.1	62.7	84.3	199.2
360	2023/04/09	17:35:19	121.43	23.75	20.0	3.48	71.3	89.6	41.3	153.7	200.0	73.0	51.8
361	2023/04/09	19:11:33	121.43	24.83	12.0	3.22	60.4	179.3	45.7	-69.8	331.5	47.8	250.5
362	2023/04/14	03:54:04	121.15	22.80	2.0	3.95	87.4	188.1	50.8	-0.9	278.7	89.3	219.2
363	2023/04/14	15:38:17	120.97	22.53	12.0	3.43	77.3	232.6	18.4	157.1	344.5	82.9	72.9
364	2023/04/16	19:17:34	120.93	22.75	10.0	3.70	81.1	198.1	63.2	-66.8	334.6	34.9	232.1
365	2023/04/17	08:49:04	121.69	24.38	26.0	4.04	82.4	194.9	88.5	-59.2	287.4	30.8	182.9
366	2023/04/21	11:44:44	121.51	23.48	33.0	4.18	79.0	240.8	67.6	144.9	345.8	57.9	26.8
367	2023/04/24	13:35:38	121.20	22.75	8.0	4.24	91.0	190.4	78.4	-10.9	282.6	79.3	191.8
368	2023/04/24	18:31:52	121.96	24.24	28.0	3.85	68.1	35.1	88.0	74.0	298.1	16.1	172.6
369	2023/04/25	07:27:41	120.53	21.67	36.0	4.43	75.7	153.2	51.9	-87.5	329.2	38.1	266.8
370	2023/05/04	08:15:47	120.93	22.75	10.0	3.50	76.1	192.5	66.9	-68.0	326.7	31.5	228.8
371	2023/05/04	08:55:31	121.61	23.79	20.0	3.69	63.2	264.6	29.0	-56.8	47.7	66.0	253.1

372	2023/05/04	15:38:21	121.29	23.48	18.0	4.67	86.3	194.5	63.5	43.5	81.4	51.9	145.4
373	2023/05/05	09:38:42	122.55	23.83	30.0	4.19	73.0	323.2	41.2	-30.0	76.6	70.8	232.8
374	2023/05/07	15:54:58	121.96	24.83	14.0	3.47	68.9	291.4	72.4	-13.4	25.6	77.2	198.0
375	2023/05/08	02:02:53	121.38	23.43	33.0	3.95	75.9	110.9	85.8	-64.8	209.7	25.5	189.8
376	2023/05/11	21:25:18	120.93	21.58	30.0	4.47	68.0	65.7	54.5	137.0	184.2	56.2	44.2
377	2023/05/15	22:28:46	121.56	21.94	2.0	3.33	67.6	80.1	33.4	-89.1	259.0	56.6	269.4
378	2023/05/23	09:00:08	122.55	23.92	28.0	4.20	82.8	58.1	83.5	51.1	320.1	39.3	169.7
379	2023/06/02	09:48:43	122.19	24.28	28.0	4.11	76.3	316.8	47.7	151.6	66.8	69.4	46.0
380	2023/06/09	19:51:02	120.61	22.89	22.0	3.80	72.2	60.1	22.5	154.6	173.8	80.6	69.5
381	2023/06/10	05:26:04	120.66	22.84	24.0	3.95	77.6	52.1	22.5	141.0	178.9	76.1	72.2
382	2023/06/10	05:31:54	120.66	22.89	22.0	4.86	91.3	183.0	72.6	58.0	67.5	36.0	149.4
383	2023/06/10	09:12:35	120.66	22.89	20.0	4.64	91.0	44.1	33.0	130.2	178.8	65.4	67.2
384	2023/06/11	12:25:39	122.50	24.24	48.0	4.68	86.2	146.6	75.4	-8.3	238.7	82.0	194.8
385	2023/06/12	12:10:19	122.96	23.66	42.0	4.12	82.1	344.8	57.6	2.1	253.6	88.2	147.6
386	2023/06/12	12:40:57	122.28	24.19	33.0	3.97	80.3	70.9	76.7	50.1	325.5	41.7	159.8
387	2023/06/12	17:34:31	122.42	24.87	8.0	3.62	69.0	318.6	39.4	-28.5	71.3	72.4	234.2
388	2023/06/13	23:52:47	122.42	24.83	4.0	3.63	65.2	294.9	34.1	-65.3	85.9	59.4	254.2
389	2023/06/13	23:56:15	122.42	24.87	8.0	4.40	71.4	311.5	30.9	-42.4	79.6	69.8	246.2
390	2023/06/14	00:28:36	122.46	24.92	8.0	3.95	67.0	257.2	39.0	-79.9	64.3	51.7	261.9
391	2023/06/14	16:50:33	122.46	24.87	2.0	4.11	69.5	105.5	75.2	-77.9	245.4	19.1	231.5
392	2023/06/14	23:58:59	121.51	23.57	30.0	4.32	86.5	10.4	55.0	36.6	257.3	60.8	138.9
393	2023/06/17	01:47:29	121.20	23.30	22.0	3.76	73.5	112.2	60.4	178.1	203.1	88.3	29.6
394	2023/06/17	06:09:34	121.20	23.30	28.0	3.63	60.7	113.2	54.6	173.7	206.9	84.8	35.6
395	2023/06/22	06:04:07	121.74	23.88	26.0	4.13	79.4	180.6	82.9	-54.4	280.4	36.2	192.1
396	2023/06/22	16:27:56	120.97	24.01	20.0	3.30	69.8	0.5	33.4	87.7	183.2	56.7	91.5
397	2023/06/22	18:45:30	121.65	24.56	60.0	4.17	90.1	263.2	60.2	58.4	134.4	42.4	132.5
398	2023/06/28	09:25:10	120.66	22.84	20.0	3.54	82.4	81.1	41.7	138.6	204.5	63.9	56.3
399	2023/06/29	14:40:45	122.50	24.74	102.0	4.41	85.0	293.4	8.6	66.2	137.5	82.2	93.5
400	2023/06/29	21:14:16	122.28	23.92	24.0	3.84	72.3	64.1	79.9	54.0	320.5	37.2	163.1
401	2023/07/06	18:03:56	121.20	23.16	16.0	4.37	84.0	202.4	81.3	24.6	108.4	65.7	170.4
402	2023/07/06	18:21:26	121.47	23.39	36.0	3.87	77.5	124.3	63.6	-48.6	241.1	47.8	216.9
403	2023/07/08	19:47:14	121.56	21.85	4.0	5.66	92.9	89.9	61.7	-81.9	253.1	29.3	255.2
404	2023/07/08	20:26:33	121.61	21.90	2.0	4.49	86.9	84.1	51.7	-82.7	252.4	38.9	260.8
405	2023/07/08	21:22:06	121.51	21.90	4.0	4.99	90.5	109.6	65.0	-71.0	250.4	31.1	235.1

406	2023/07/08	22:46:38	121.61	21.90	2.0	3.31	65.1	94.1	43.4	-77.6	257.3	47.8	258.5
407	2023/07/09	01:20:22	121.61	21.90	2.0	3.68	74.5	88.2	44.7	-87.0	264.0	45.4	267.1
408	2023/07/09	01:53:50	121.61	21.90	2.0	4.59	86.4	95.4	58.3	-75.6	249.4	34.5	248.1
409	2023/07/09	02:05:02	121.56	21.99	2.0	3.70	68.0	99.4	43.7	-36.5	217.5	65.7	232.4
410	2023/07/09	02:56:42	121.61	21.90	2.0	3.87	74.4	90.0	50.0	-79.2	253.5	41.2	257.4
411	2023/07/09	03:31:59	121.61	21.90	2.0	4.61	86.3	90.0	47.7	-74.7	248.0	44.5	253.8
412	2023/07/09	03:49:56	121.51	21.90	4.0	3.59	66.8	101.4	66.8	-66.6	233.7	32.5	227.2
413	2023/07/09	05:27:29	121.47	21.90	2.0	4.26	69.0	118.5	82.8	-68.7	226.3	22.5	199.2
414	2023/07/09	07:52:53	121.61	21.85	2.0	4.43	85.0	262.3	42.6	-88.6	80.5	47.4	268.8
415	2023/07/09	08:16:36	121.61	21.85	2.0	4.58	83.4	97.3	50.4	-81.0	263.4	40.5	259.3
416	2023/07/09	09:38:01	121.61	21.90	2.0	3.55	63.5	102.5	39.1	-84.0	274.8	51.1	265.2
417	2023/07/09	17:27:45	121.51	21.90	2.0	3.52	77.0	102.9	76.3	-71.2	227.7	23.1	217.2
418	2023/07/09	22:11:33	121.51	24.06	30.0	4.76	89.1	51.3	42.4	105.9	210.2	49.5	75.9
419	2023/07/11	11:42:07	121.51	24.06	28.0	3.43	71.7	52.3	42.5	109.5	206.7	50.4	73.0
420	2023/07/11	17:55:11	122.46	23.92	24.0	4.01	80.0	63.6	79.8	50.8	321.3	40.3	164.1
421	2023/07/14	11:53:18	122.46	23.97	28.0	3.97	63.1	63.1	78.0	46.4	320.8	44.9	162.9
422	2023/07/15	07:50:51	121.38	23.48	14.0	3.78	79.9	89.2	38.8	157.3	197.3	76.0	53.5
423	2023/07/22	13:36:00	121.65	24.06	10.0	3.37	86.0	230.0	80.0	-79.8	3.8	14.2	224.7
424	2023/07/23	10:01:57	121.02	22.17	20.0	3.68	65.5	146.2	14.4	-3.5	239.6	89.1	255.6
425	2023/07/30	16:44:34	121.96	25.36	10.0	4.01	78.7	52.4	58.2	-76.3	207.6	34.3	249.1
426	2023/08/01	17:07:32	122.42	26.00	164.0	4.66	67.0	154.8	27.5	58.5	9.4	66.8	105.2
427	2023/08/04	12:22:14	121.65	21.85	4.0	4.71	76.3	104.9	50.6	-74.4	261.1	41.9	251.9
428	2023/08/04	12:25:19	121.69	21.90	4.0	4.61	63.5	286.1	39.0	-75.7	88.0	52.4	258.7
429	2023/08/08	10:38:14	121.56	23.30	39.0	4.04	90.8	337.9	41.3	45.8	210.2	61.8	121.5
430	2023/08/10	02:02:18	121.88	24.87	90.0	4.21	76.8	61.7	38.6	157.5	169.6	76.2	53.6
431	2023/08/11	10:24:00	120.93	23.30	8.0	3.76	81.8	347.2	82.6	-19.3	79.8	70.9	187.9
432	2023/08/13	12:06:23	120.66	21.67	22.0	4.45	68.8	248.2	63.1	-37.3	357.2	57.3	212.5
433	2023/08/13	18:41:23	122.42	24.42	54.0	3.95	70.9	32.0	66.0	121.3	155.8	38.7	40.6
434	2023/08/15	17:09:18	121.69	24.15	33.0	4.31	72.8	6.3	81.8	63.7	260.2	27.5	162.0
435	2023/08/16	14:58:53	120.39	23.57	8.0	3.38	60.7	172.1	83.0	12.8	80.5	77.3	172.8
436	2023/08/17	03:52:14	121.29	22.84	14.0	3.28	66.0	245.8	54.8	179.4	336.1	89.5	35.2
437	2023/08/20	07:10:43	121.51	23.52	36.0	3.86	73.5	6.2	65.4	54.6	245.8	42.2	141.7
438	2023/08/27	11:04:46	121.07	22.93	12.0	3.72	68.7	104.7	82.6	153.2	198.4	63.5	8.3
439	2023/08/31	04:49:04	120.43	23.52	6.0	3.94	72.4	80.0	76.8	167.6	172.9	77.9	13.5

440	2023/08/31	18:58:44	122.28	24.96	12.0	3.98	76.4	262.1	59.2	-60.8	34.6	41.5	230.7
441	2023/09/05	03:13:51	120.79	22.26	16.0	4.48	86.4	1.1	87.1	11.0	270.6	79.0	177.1
442	2023/09/05	09:30:41	120.39	23.57	10.0	4.94	83.2	80.4	71.6	169.8	173.6	80.3	18.7
443	2023/09/06	05:21:38	120.71	22.89	14.0	3.85	83.8	351.9	72.7	-21.8	88.7	69.2	198.6
444	2023/09/06	19:02:52	121.79	24.24	12.0	3.29	70.4	159.9	31.8	-16.5	264.1	81.4	239.3
445	2023/09/15	10:34:31	121.83	24.42	45.0	4.49	88.9	62.5	58.0	138.1	178.0	55.5	40.0
446	2023/09/16	20:41:36	120.84	22.26	14.0	3.51	64.0	265.4	85.9	175.2	355.8	85.2	4.1
447	2023/09/19	23:44:07	122.68	24.10	28.0	4.02	69.7	241.1	87.5	91.4	31.9	2.9	60.8
448	2023/09/20	11:09:52	121.79	24.24	16.0	3.59	76.2	138.2	43.3	-40.2	259.8	63.7	234.2
449	2023/09/20	12:36:29	121.38	22.89	26.0	3.61	79.9	228.4	57.9	121.3	359.6	43.7	50.4
450	2023/10/05	08:53:15	122.42	23.97	33.0	4.52	75.6	64.2	64.6	53.1	304.5	43.7	141.7
451	2023/10/11	10:36:58	121.25	23.30	18.0	5.28	91.9	97.9	50.8	163.6	198.4	77.4	40.4
452	2023/10/12	12:16:31	120.57	22.93	18.0	4.42	88.3	189.7	75.5	116.1	306.8	29.6	30.5
453	2023/10/14	07:53:32	122.32	23.97	26.0	5.11	82.0	63.9	76.5	52.4	317.0	39.6	158.5
454	2023/10/14	08:05:14	122.32	23.97	28.0	4.43	75.5	69.0	74.6	59.8	314.4	33.6	151.2
455	2023/10/14	14:04:08	122.28	23.97	28.0	4.63	79.0	67.5	73.6	48.4	319.8	44.1	156.1
456	2023/10/18	16:00:28	121.25	23.30	24.0	3.65	73.5	112.1	60.6	176.5	203.8	86.9	29.4
457	2023/10/19	08:08:10	122.06	24.65	14.0	3.37	60.3	332.4	64.2	12.3	237.0	79.0	153.6
458	2023/10/20	07:00:57	120.79	23.20	4.0	3.57	80.0	149.0	88.0	-26.3	240.0	63.8	182.3
459	2023/10/22	10:17:32	120.93	23.30	6.0	3.46	76.0	345.4	77.6	-11.5	77.9	78.8	192.6
460	2023/10/23	13:19:21	121.33	22.98	20.0	4.42	87.4	230.0	41.0	116.0	18.0	53.0	68.0
461	2023/10/23	23:05:28	122.64	24.10	36.0	5.94	94.4	305.0	38.0	149.0	60.0	71.0	55.0
462	2023/10/24	02:54:26	122.68	23.97	33.0	4.71	89.8	308.0	54.0	150.0	56.0	66.0	39.0
463	2023/10/28	02:16:12	121.38	22.53	30.0	4.38	82.8	317.6	85.2	-13.6	48.7	76.4	184.9
464	2023/10/29	09:36:06	121.47	23.43	30.0	3.95	80.9	331.3	41.2	34.4	214.1	68.2	125.8
465	2023/10/29	18:12:36	121.56	23.75	16.0	3.83	68.9	200.0	88.7	-77.3	295.7	12.8	185.9
466	2023/10/31	12:33:54	121.61	23.35	48.0	4.35	83.4	2.9	58.3	66.8	222.1	38.5	122.5
467	2023/11/07	21:34:14	121.92	24.28	12.0	3.71	59.9	158.4	67.8	175.8	249.9	86.1	22.3

參考文獻

Lee, S. J., W. T. Liang, H. W. Cheng, F. S. Tu, K. F. Ma, H. Tsuruoka, H. Kawakatsu, B. S. Huang and C. C. Liu, 2013. *Toward real-time regional earthquake simulation I: Real-time Moment Tensor monitoring (RMT) for regional events in Taiwan*, Geophys. J. Int., doi: 10.1093/gji/ggt371.

臺灣地區 112 年中大型地震震源資訊之快速彙整與提供

子計畫二

評估最新地動預估式對臺灣地震預警系統之適用性

林彥宇 高嘉謙 吳祖霆

中華民國地球物理學會

摘要

地震預警為利用地震學理論在具破壞性的剪力波到達之前，提前通報重要機關及民眾以達到減災的有效作為，也為中央氣象署重要業務。地震發生後，經快速解算，獲知地震位置及規模後，藉由地震參數與地動值的衰減關係式(attenuation relationship)，可以推估各地振動的情形。而近年地動預估相關研究蓬勃發展，地動預估式在之前主要應用於地震危害度的分析(seismic hazard analysis)，由於即時地震學的發展，地動預估式也被使用於地震後震度分布以及災害損失的評估，為能在地震發生後可以迅速推估各地的震度，加上即時作業時無法獲得完整資訊的限制，因此預估式必須在某些假設下，盡量簡化參數的個數，評估後篩選或建立合適的衰減公式以應用於地震預警作業之預估模式。

本計畫使用近年發表或完成之 62 個地動預估式與目前應用於中央氣象署地震預警的預估式，利用臺灣地區之強震資料，以地動參數殘差分析方式檢視地動預估模型內參數(規模與距離)預測誤差(觀測值與預估值之差值)是否滿足線性迴歸的假設，另一方面也針對最大地動加速度(peak ground acceleration, PGA)及最大地動速度(peak ground velocity, PGV)進行檢量線迴歸分析，了解觀測值與預估值之間的關係。

結果顯示，新一代地動預估式(Idriss, 2014)於淺部地殼地震類型的表現，檢量線在大振幅區段相比現行地震預警預估式更為接近標準值，隱沒帶地震及界面型地震類型(Lin and Lee et al., 2008; Phung et al., 2020; Arroyo et al., 2010; Zhao et al., 2006)也可從檢量線斜率項得知低估或過估之情形減少許多，災害性地震來臨時可以更準確的預測。而隱沒帶內部型地震類型(Chao et al., 2020)則顯示會造成預估值的低估與高估，但震度四以上仍具一定可信度。地動速度方面，本計畫所收錄之模型除淺部地殼地震類型(Boore et al., 2014)及隱沒帶內部型(Si et al., 2000)外均尚有改進空間，後續會再進行其他相關研究。

關鍵字：地震預警、地動預估式、殘差分析、檢量線

Abstract

The earthquake early warning (EEW) system aims to warn the public in advance when a large event occurs. These can reduce life and economic losses. The EEW is one of the important missions of the Central Weather Administration (CWA). When an earthquake occurs, the CWA-EEW system predicts intensity (ground shaking) in different regions by using a ground motion prediction equation (GMPE). The rapidly determined source parameters (e.g., location and magnitude) and the site effects of the regions are considered in the calculation. The GMPE, which is widely used by academia and industry, is usually applied in studies of seismic hazard assessment. However, seismologists extended its application in the recent year. The GMPE now is applied to predict the seismic intensity distribution and to evaluate losses for an earthquake in real-time seismology (e.g., EEW). To satisfy these proposes, a simple and efficient GMPE is necessary. Complexity of the GMPE and the number of parameters within it must be simplified.

This project includes the prediction equation which the CWA has applied (Hsiao, 2007) and those which are used in seismic hazard analyses. With the strong ground motion records in Taiwan, we examine the prediction error (the residual between the observed and predicted value) of ground motion parameters (magnitude and distance) meet the assumption of linear regression by residual analysis. Peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) are also analyzed by using calibration curve regression to identify the relationship between observed and predicted values. The results show that the GMPE perform better than the current prediction equation in the large amplitude range of shallow crustal earthquake type, as indicated by the calibration curve of ground motion acceleration being closer to the standard value. The slope of the subduction zone earthquake and interface earthquake types also show less underestimation or overestimation, which enables more accurate prediction when a large event occurs. For the subduction intraslab earthquake types, the predicted values show both underestimation and overestimation, but still have a certain level of reliability for intensity above 4. In terms of ground motion velocity, there is still room for improvement in the models included in this project except shallow crustal earthquake type, and further related studies will be conducted in the future.

Keywords: earthquake early warning, ground motion prediction equation, residual analysis, calibration curve

一、研究目的

地動預估式的研究在之前主要應用於地震危害度的分析(seismic hazard analysis)，近年來由於即時地震學的發展，配合地震救災快速反應的需要，地動預估式也被使用於地震後震度分布(蕭乃祺，2007)以及災害損失的評估，為能在地震發生後可以迅速推估各地的震度，加上即時作業時無法獲得完整資訊的限制，因此預估式必須在某些假設下，盡量簡化參數。本計畫將評估並篩選合適的衰減公式後，與現行氣象署使用之地震預警預估式(蕭乃祺，2007)比較，其中後者為針對地震預警所建立的，故在相關參數上皆已能快速解算的為主，例如地震規模類型，以芮氏規模為主；震源到場址的距離類型以震源距或震央距為主，而地震危害度分析相較於地震預警屬於非即時需求之工作，故偏向使用地震矩規模以及距離斷層破裂面最短距離為主；場址項亦為影響地動值之要項，以該場址之經驗調整係數或以連續型場址參數(例如地表下 30 公尺內之平均剪力波速，Vs30)代表不同場址類型對地動值的變化，以上參數差異造成預估結果的變化將是本計畫之研究重點之一，本研究將藉由殘差分析方式分析兩者異同，亦篩選相關的參數轉換式提供後續使用，期盼能借助新一代地動預估式精進地震預警作業。

二、地震資料來源及分類

本計畫使用 1992 年至 2014 年臺灣強地動觀測計劃(Taiwan Strong Motion Instrumentation Program，簡稱 TSMIP)所收錄之強震資料(表 2-1)。

EQ_ID	STA_ID	STA_Lon_X	STA_Lat_Y	Hyp.Lat	Hyp.Long	Hyp.Depth	MW	Ztor	Strike	Dip	Rake	fault.type	eq.type	Vs30	Z1.0	Rx	Ry	Repi	Rhyp
1992_0419_1832_21	ALS	120.8133611	23.50827778	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	524.6131	60	64.94	61.77	85.4371225	86.1903638
1992_0419_1832_21	EHC	121.7401791	24.26540615	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	760	109	4.92	-49.53	50.0473091	51.3226075
1992_0419_1832_21	EHY	121.3279167	23.50383333	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	760	22.88678335	15.38	44.45	45.0596546	46.4720278
1992_0419_1832_21	ENT	121.5736389	24.6372776	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	770	21.8905948	34.96	-82.63	88.2443952	88.9738736
1992_0419_1832_21	CHY	120.4326417	23.49606111	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	201.4775	445.639851	101.09	76.1	121.9574978	122.4863591
1992_0419_1832_21	HEN	120.7460278	22.00366667	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	198.4127	129	15.02	221.74	221.4373473	221.7290591
1992_0419_1832_21	HSN	121.0141907	24.82813835	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	427.1375	91	95.35	-83.36	122.9971916	123.5216015
1992_0419_1832_21	HWA	121.61345	23.975225	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	503.5246727	216.1	5.94	-14.79	15.309612	19.0690981
1992_0419_1832_21	ESL	121.4415278	23.81180556	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	629.590766	10.8	16.17	8.28	13.2964328	17.4949143
1992_0419_1832_21	KAU	120.3158083	22.56625	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	145.219395	353	77.77	177.62	191.3322693	191.6698051
1992_0419_1832_21	NCU	121.1944199	24.96727753	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	370.7136	87	83.48	-104.1	130.5488417	131.0430348
1992_0419_1832_21	NST	121.0086111	24.62942222	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	807.6457	29	88.4	-62.36	104.1397946	104.7596451
1992_0419_1832_21	NSY	120.7688425	24.41440326	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	591.9495	21	103.18	-31.65	102.9510492	103.5770024
1992_0419_1832_21	PNG	119.5635611	23.56502222	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	279.803	8	187.3	98.28	206.5280582	206.840798
1992_0419_1832_21	SCL	120.2017517	23.17344475	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	124.8959	782.4	111.34	117.83	158.0775221	158.4858981
1992_0419_1832_21	SGL	120.4985667	22.72375556	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	194.9493821	236	65.94	154.82	165.7666031	166.156082
1992_0419_1832_21	SGS	120.5906333	23.08041667	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	760	18	70.37	114.27	131.0129456	131.5053946
1992_0419_1832_21	SML	120.9081611	23.88143889	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	760	23	69.86	19.42	67.1905309	68.145758
1992_0419_1832_21	SSD	120.64015	22.7443	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	492	8	53.02	147.79	154.7919255	155.2089466
1992_0419_1832_21	STV	120.7657583	23.16073889	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	760	6	56.49	99.83	111.6903252	112.2675627
1992_0419_1832_21	TAI	120.2049611	22.99316667	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	245	451	104.34	136.63	168.2866063	168.6702664
1992_0419_1832_21	TAP	121.5138222	25.03764722	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	177.4248608	555	55.86	-122.42	132.8960159	133.3815128
1992_0419_1832_21	TTN	121.1546667	22.75222222	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	491.6637	58	3.62	129.13	128.6303091	129.1318447
1992_0419_1832_21	WGK	120.570375	23.68452222	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	252.3659	149	94.88	51.63	103.0649268	103.6901925
1992_0419_1832_21	WNT	120.6924744	23.87664032	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	506.4573	10	90.34	27.32	89.0898098	89.8124218
1992_0419_1832_21	WSF	120.2297745	23.63636017	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	170.8915	749.1	125.81	68.29	138.1877466	138.6547158
1992_0419_1832_21	WTC	120.2890694	23.86146667	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	222.8992	761.4	128.47	42.65	130.0970823	130.592985
1992_0419_1832_21	WTP	120.6223333	23.24369444	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	836.1204	9	73.42	96.06	117.2982015	117.847974
1992_0419_1832_21	ILA	121.7560889	24.76356389	23.8443	121.5672	11.37	6.1	7.007	200	39	42	RO	shallow crustal	242.4099532	611	22.44	-102.15	104.074619	104.6938547
1992_0928_1406_03	ILA	121.7560889	24.76356389	23.9133	122.616	15.04	6.12	11.689	290	28	130	RO	subduction interface	242.4099532	611	65.75	113.68	128.6629066	129.5389715
1992_0928_1406_03	TAP001	121.5138222	25.03764722	23.9133	122.616	15.04	6.12	11.689	290	28	130	RO	subduction interface	177.4248608	555	86.28	146.95	167.6745042	168.3476788

表 2-1、1992 年至 2014 年臺灣強地動觀測計劃(TSMIP)所收錄之強震資料範例

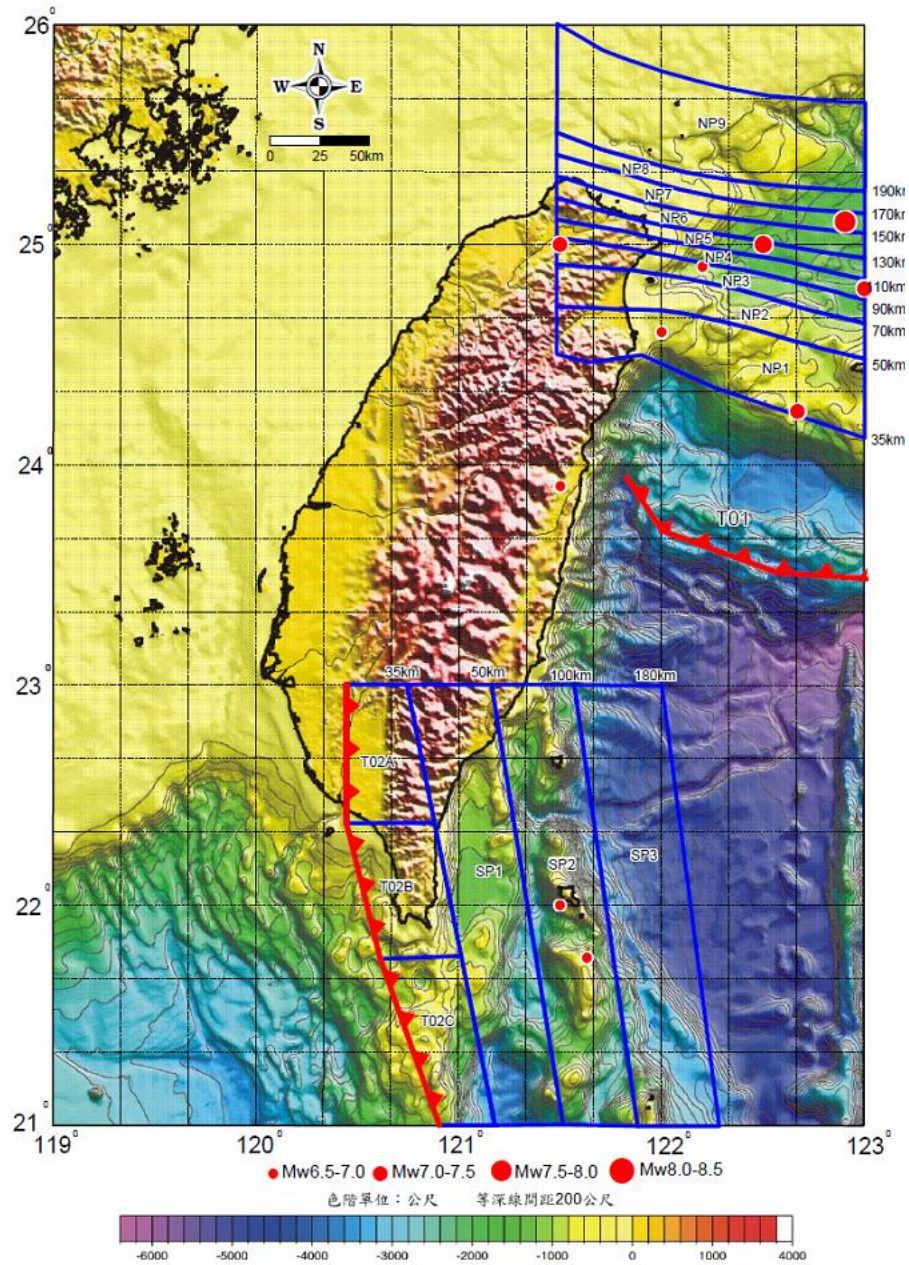


圖 2-2、隱沒帶分布圖

(摘自鄭錦桐，2002)

三、地動預估式

1. 現行地動預估式

為精進中央氣象署地震預警作業，本計畫將比較現行預警預估式與新一代地動預估式之差異。中央氣象署目前使用於地震預警之 Peak Ground Acceleration(PGA)預估式為蕭乃祺於 2007 發表的改版(簡稱 Hsiao2007)，預估公式如下(式一)。

$$PGA = 12.44 \times \exp(1.31 \times M_L) \times R_{hypo}^{-1.837} \times Si \quad (\text{式一})$$

其中 Si 項為場址放大因子，參照表如表 3-1，每個縣市會有三個參考點，並依地震震源深度 40 公里分成淺部(site_s)與深部(site_d)，目前預估式所使用之參考點為該縣市最大的場址放大因子。

另蕭乃祺於 2007 發表之論文中也有提及 Peak Ground Velocity(PGV)預估公式，同樣簡稱 Hsiao2007，預估公式如下(式二)。

$$PGV = 0.003 \times \exp(1.970 \times M_L) \times R_{hypo}^{-1.425} \times Si \quad (\text{式二})$$

Si 項為場址修正因子(格點模式，如表 3-2)，每個縣市有數個參考點，預估式所使用之參考點為該縣市內最大的場址修正因子，同樣依地震震源深度 40 公里分成淺部(site_s)與深部(site_d)。

2. 新一代地動預估模型

本計畫蒐集國內外較為常用之地動預估相關文獻(Abrahamson et al., 2016; Akkar and Çağnan, 2010; Akkar et al., 2014; Arroyo et al., 2010; Atkinson and Boore, 2003; Atkinson and Macias, 2009; Bindi et al., 2014; Boore et al., 2014; Campbell and Bozorgnia, 2003; Chao et al., 2020; García et al., 2005; Gregor et al., 2006; Idriss, 2014; Kale et al., 2015; Kanno et al., 2006; Lin, 2009; Lin and Lee, 2008; Lin, 2011; Loh, 1996; Montalva et al., 2017; Phung et al., 2020; Phung et al., 2020; Shoushtari et al., 2018; SI and Midorikawa, 1999; Stewart et al., 2016; Youngs et al., 1997; Zhao et al., 2006; Zhao et al., 2016; 國家地震工程研究中心, 2011; 財團法人中興工程顧問社, 2012)，經挑選臺灣地區適用之模型後，根據文獻內容進行建模，並將模型以研究對象及所適用之地震類型進行分類。研究對象以本計畫之需求分成 PGA、PGV，在表 3-3 中以 0、1 標註(0 表示該模型不包含此研究對象，1 表示該模型包含此研究對象)。而地震類型共可分為四類：淺部地殼地震(cru)、隱沒帶地震(sub)、隱沒帶界面型地震(sub_inter)、隱沒帶內部型地震(sub_slab)。其中模型後帶有英文字母 B、C、E、F 表示該模型為原模型經臺灣地震危害分析資深委員會計畫(Taiwan SSHAC Project)

內係數修改後之不同版本模型。除研究對象及地震類型外，也整理出各模型所使用的參數，以便後續資料處理(詳見表 3-3)。

表 3-1、場址放大因子參照表

site_info_pws	lon	lat	site_s	site_d	sprint
site_info_pws[0]	0				
site_info_pws[0]	1				
site_info_pws[0]	121.564	25.04	site_s[0] = 1.948	site_d[0] = 2.865	sprintf(site_info_pws[0].code,"TAP")
site_info_pws[0]	121.564	25.04	site_s[0] = 1.948	site_d[0] = 2.865	sprintf(site_info_pws[0].code,"TAP")
site_info_pws[0]	121.564	25.04	site_s[0] = 1.948	site_d[0] = 2.865	sprintf(site_info_pws[0].code,"TAP")
site_info_pws[1]	0				
site_info_pws[1]	1				
site_info_pws[1]	121.744	25.133	site_s[0] = 1.347	site_d[0] = 2.313	sprintf(site_info_pws[1].code,"KLU")
site_info_pws[1]	121.744	25.133	site_s[1] = 1.347	site_d[1] = 2.313	sprintf(site_info_pws[1].code,"KLU")
site_info_pws[1]	121.744	25.133	site_s[2] = 1.347	site_d[2] = 2.313	sprintf(site_info_pws[1].code,"KLU")
site_info_pws[2]	0				
site_info_pws[2]	3				
site_info_pws[2]	121.465	25.012	site_s[0] = 1.795	site_d[0] = 2.238	sprintf(site_info_pws[2].code,"BAC")
site_info_pws[2]	121.443	25.187	site_s[1] = 1.520	site_d[1] = 2.650	sprintf(site_info_pws[2].code,"BAC")
site_info_pws[2]	121.711	24.936	site_s[2] = 1.112	site_d[2] = 1.478	sprintf(site_info_pws[2].code,"BAC")
	...				

表 3-2、場址修正因子參照表(格點模式)

Longitude	latitude	site
119.950	22.400	0.840
119.950	22.450	1.129
119.950	22.500	1.042
119.950	22.550	1.395
119.950	22.600	1.576
119.950	22.650	1.594
119.950	22.700	1.769
119.950	22.750	1.832
119.950	22.800	1.789

表 3-3、本計畫所收錄國內外研究之地動預估模型及分類

name	EQ_type	PGA	PGV	parameter
AB03 (Atkinson and Boore, 2003)	sub	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, depth, Sc, Sd, Se
AC10 (Akkar and Çağnan, 2010)	cru	1	1	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
AGA16.tw.C01 (Abrahamson et al., 2016)	sub	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, Vs30, Ztor, depth, Rhypo
AGA16.tw.F10 (Abrahamson et al., 2016)	sub	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, Vs30, forearc(0:forearc), Ztor, depth, Rhypo
AM09 (Atkinson and Macias, 2009)	sub_inter	1	0	Mag, Rrup, Prd
Arroyo2010 (Arroyo et al., 2010)	sub_inter	1	0	Mag, Rrup, Prd
ASB14 (Akkar et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
ASB14.tw.B01 (Akkar et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
ASB14.tw.C01 (Akkar et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
ASB14.tw.E02 (Akkar et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
name	EQ_type	PGA	PGV	parameter
BCHydroSub2018Global (Abrahamson et al., 2016)	sub	1	0	Mag, ftype, Rrup, Vs30, Prd, forearc(0:forearc), depth, Rhypo
BCHydroSub2018SouthAM (Abrahamson et al., 2016)	sub	1	0	Mag, ftype, Rrup, Vs30, Prd, forearc(0:forearc), depth, Rhypo
BCHydroSub2018TW (Abrahamson et al., 2016)	sub	1	0	Mag, ftype, Rrup, Vs30, Prd, forearc(0:forearc), depth, Rhypo

BCHydroSubV3 (Abrahamson et al., 2016)	sub	1	0	Mag, ftype, Rrup, Vs30, Prd, forearc(0:forearc), depth, Rhypo
BI14 (Bindi et al., 2014)	cru	1	1	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
BI14.tw.B01 (Bindi et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
BI14.tw.C01 (Bindi et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
BI14.tw.E02 (Bindi et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30
BSSA14 (Boore et al., 2014)	cru	1	1	Mag, Rjb, Prd, Vs30, ftype, Z1.0, regionflag(0:Global), basinflag(0)
BSSA14.tw.B01 (Boore et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, Vs30, ftype, Z1.0, regionflag(0:Global), basinflag(0)
name	EQ_type	PGA	PGV	parameter
BSSA14.tw.C01 (Boore et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, Vs30, ftype, Z1.0, regionflag(0:Global), basinflag(0)
BSSA14.tw.E02 (Boore et al., 2014)	cru	1	0	Mag, Rjb, Prd, Vs30, ftype, Z1.0, regionflag(0:Global), basinflag(0)
Camp03H (Campbell and Bozorgnia, 2003)	cru	1	0	Mag, Rjb, Rseis(Rhypo), Prd, Svfs, Ssr, Sfr, Frv, Fth, hwflag(0:foot-wall)
Chao20(cru) (Chao et al., 2020)	cru	1	0	Mag, Rrup, ftype, Vs30_class(0:estimated), Vs30, Prd, sourcetype, Ztor, Z1.0, msasflag(0:mainshocks)
Chao20(sub) (Chao et al., 2020)	sub	1	0	Mag, Rrup, ftype, Vs30_class(0:estimated), Vs30, Prd, sourcetype, Ztor, Z1.0, msasflag(0:mainshocks)
Chao20(sub_inter) (Chao et al., 2020)	sub_inter	1	0	Mag, Rrup, ftype, Vs30_class(0:estimated), Vs30, Prd, sourcetype, Ztor, Z1.0, msasflag(0:mainshocks)
Chao20(sub_slab)	sub_slab	1	0	Mag, Rrup, ftype, Vs30_class(0:estimated), Vs30,

(Chao et al., 2020)				Prd, sourcetype, Ztor, Z1.0, msasflag(0:mainshocks)
Garcia05 (García et al., 2005)	sub_slab	1	0	Mag, Rrup, Prd, depth
Gregor06 (Gregor et al., 2006)	sub_inter	1	0	Mag, Rrup, Prd, Vs30
I14 (Idriss, 2014)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, Vs30
name	EQ_type	PGA	PGV	parameter
I14.tw.B01 (Idriss, 2014)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, Vs30
I14.tw.C01 (Idriss, 2014)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, Vs30
I14.tw.E04 (Idriss, 2014)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, Vs30, Ztor
KAHH15 (Kale et al., 2015)	cru	1	1	Mag, Rjb, Prd, ftype, Vs30, regionflag(0:Turkey)
Kanno06(cru) (Kanno et al., 2006)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd, Vs30, depth
Kanno06(sub) (Kanno et al., 2006)	sub	1	0	Mag, Rrup, Prd, Vs30, depth
Kanno06(sub_inter) (Kanno et al., 2006)	sub_inter	1	0	Mag, Rrup, Prd, Vs30, depth
Kanno06(sub_slab) (Kanno et al., 2006)	sub_slab	1	0	Mag, Rrup, Prd, Vs30, depth
Lin09 (Lin, 2009)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd, Vs30, ftype
Lin11 (Lin et al., 2011)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd, hwflag(0:foot-wall)
name	EQ_type	PGA	PGV	parameter

LL08 (Lin and Lee, 2008)	sub	1	0	Mag, Rrup, depth, ftype, Prd, Vs30
LL08.C02 (Lin and Lee, 2008)	sub	1	0	Mag, Rrup, Ztor, ftype, Prd, Vs30
LL08.F04 (Lin and Lee, 2008)	sub	1	0	Mag, Rrup, Ztor, ftype, Prd, Vs30
Loh96 (Loh, 1996)	cru	1	0	Mag, Rrup
MBR17 (Montalva et al., 2017)	sub	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, Vs30, forearc(0:forearc), depth, Rhypo
NCREE2011 (國家地震工程研究中心，2011)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd
PhungCru20 (Phung et al., 2020)	cru	1	0	Mag, Rrup, Rjb, Rx, Prd, Vs30, Dip, Ztor, ftype, Z1.0, Vs30_class, regionflag, hwflag
PhungSub20 (Phung et al., 2020)	sub	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, Vs30, Z1.0, Ztor, regionflag
Shoushtari18 (Shoushtari et al., 2018)	sub_inter	1	1	Mag, Rhypo, Prd, depth, Sclass

name	EQ_type	PGA	PGV	parameter
SI1999(cru) (SI and Midorikawa, 1999)	cru	1	1	Mag, Rhypo, Prd, depth, eq.type
SI1999(sub_inter) (SI and Midorikawa, 1999)	sub_inter	1	1	Mag, Rhypo, Prd, depth, eq.type
SI1999(sub_slab) (SI and Midorikawa, 1999)	sub_slab	1	1	Mag, Rhypo, Prd, depth, eq.type
Sinotech12 (財團法人中興工程顧問社，2012)	cru	1	0	Mag, Rrup, Prd, Vs30, ftype
Stewart16 (Stewart et al., 2016)	cru	1	1	Mag, Rjb, Prd, Vs30, ftype
Youngs97Rock (Youngs et al., 1997)	sub	1	0	Mag, Rrup, Prd, ftype, depth
Zh06(cru) (Zhao et al., 2006)	cru	1	0	Mag, Rrup, ftype, sclass, Prd, sourceclass, depth
Zh06(sub) (Zhao et al., 2006)	sub	1	0	Mag, Rrup, ftype, sclass, Prd, sourceclass, depth
name	EQ_type	PGA	PGV	parameter
Zh06(sub_inter) (Zhao et al., 2006)	sub_inter	1	0	Mag, Rrup, ftype, sclass, Prd, sourceclass, depth
Zh16Cru (Zhao et al., 2016)	cru	1	0	Mag, Rrup, ftype, sclass, Prd, sourceclass, depth
Zh16Inter	sub_inter	1	0	Mag, Rrup, sclass, Prd, depth

(Zhao et al., 2016)				
Zh16Slab (Zhao et al., 2016)	sub_slab	1	0	Mag, Rrup, sclass, Prd, depth
Zh16Sub (Zhao et al., 2016)	sub	1	0	Mag, Rrup, sclass, Prd, sourceclass, depth
Remark	Sc: 1 = $360 < V_s < 760$, 0 = else Sd: 1 = $180 < V_s < 360$, 0 = else Se: 1 = $V_s < 180$, 0 = else Svfs: 1 = $360 < V_s < 760$ Ssr: 1 = $360 < V_s < 760$ Sfr: 1 = $760 < V_s < 1500$ Sclass: 0 = $V_{s30} > 1500$, 1 = $760 < V_s < 1500$, 2 = $360 < V_s < 760$, 3 = $180 < V_s < 360$, 4 = $V_s < 180$ Sourcetype: 0 = crustal, 1 = Subduction Sourceclass: 0 = crustal, 1 = subduction interface, 2 = subduction intraslab Frv: 1 = reverse fault, 0 = strike slip & normal fault Fth: 1 = thrust fault, 0 = strike slip & normal fault Vs30_class: 0 = estimated, 1 = measured forearc: 0 = Forearc site, 1 = Backarc site basinflag: Basin Adjustments Msasflag: 0 = Mainshocks, 1 = Aftershocks hwflag: 0 = foot-wall, 1 = hanging-wall			

四、地動預估式參數

1. 規模參數

現行應用於地震危害度分析之地動預估模型在規模項上多為使用地震矩規模，為考量地震預警應用時，在短時間內以芮氏規模較為便於計算，故本計畫統一規模，將芮氏規模轉換為地動預估模型可用之地震矩規模，在資料的換算上採用鄭世楠等人(2010)建立之規模轉換公式，轉換式如式二。

$$M_L = 0.961M_w + 0.338 \pm 0.256 \quad (M_L \leq 6.0)$$

$$M_L = 5.115 \ln(M_w) - 3.131 \pm 0.379 \quad (M_L \geq 5.5) \quad (\text{式三})$$

另外，目前公布的地震矩規模來源有二，分別為臺灣寬頻地震網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)及哈佛地震中心(Global Centroid Moment Tensor, Global CMT)，不同來源之地震矩規模可能存在系統性誤差，本計畫同樣採用鄭世楠等人(2010)建立之轉換公式，將地震矩規模統一為 Global CMT，轉換式如式三。

$$M_{W(GCMT)} = 0.951M_{w(CWB_{BB})} + 0.434 \pm 0.14 \quad (\text{式四})$$

圖 4-1 為臺灣強地動觀測計劃收錄之地震矩規模與芮氏規模分佈圖。

2. 距離參數

一般地動預估式使用之距離參數有距斷層破裂面最短距離(R_{rup})、斷層面地表投影距離(R_{jb})以及震源距離(R_{hypo})，現行應用於地震危害度分析之地動預估模型多數採距斷層破裂面最短距離。由於在地震發生後反應時間有限，預警模式能夠發布之距離參數只有震源距離，若資料處理時採用距斷層破裂面最短距離，無法較為迅速地應用於現行地震預警作業。因此本計畫將原先使用之距斷層破裂面最短距離嘗試以震源距離取代，並於後續進行殘差分析。將震源距離與距斷層破裂面最短距離展繪如圖 4-2，由結果可得於近場的部分兩者差異較大，但為求效率，與地震預警盲區限制，故擬暫時忽略該參數的差異。

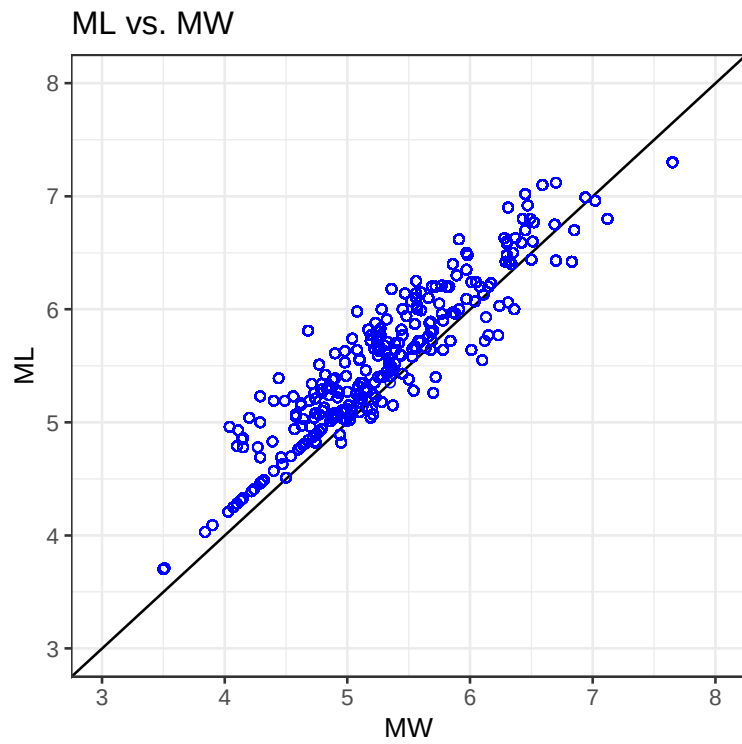


圖 4-1、地震矩規模與芮氏規模分佈圖

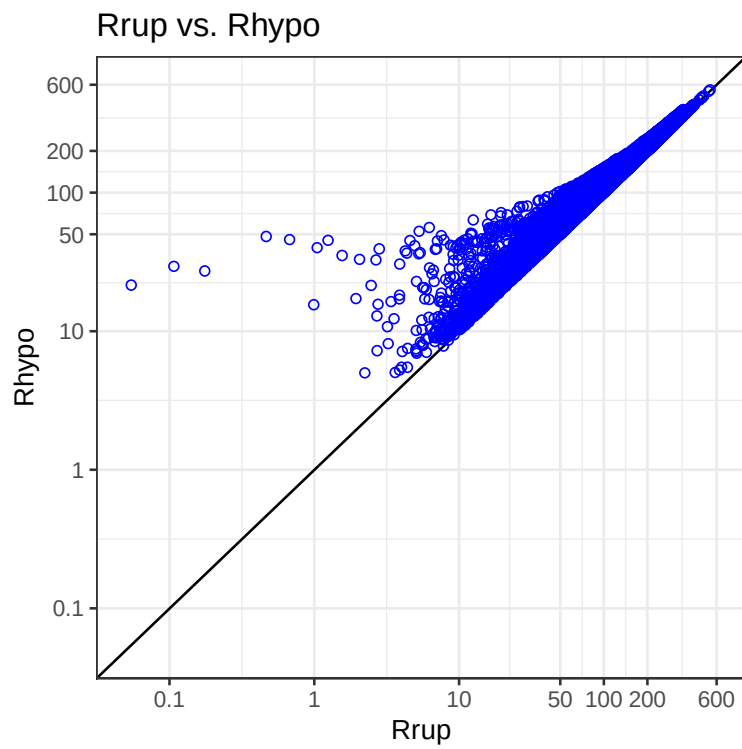


圖 4-2、震源距離與距斷層破裂面最短距離比較圖

五、研究方法

本計畫將利用參數殘差分析計算各模型 PGA 與 PGV 預測誤差殘差值(residual)，並進行實際觀測資料與預測資料的比對並繪製觀測與預測資料分佈圖，再利用檢量線迴歸分析以逐一審視出不同地震類型中各預估式的表現。

1. 參數殘差分析

殘差分析為迴歸分析中針對預測誤差(或稱作估計誤差)所進行的分析，可用來檢視是否滿足線性迴歸的假設。而在地動預估式中，殘差值(residual)為實際觀測值(observed value)與地動預估式的估計值(predicted value)之差值，本計畫所使用之殘差值單位依地動預估式研究對象分為 PGA 與 PGV。差值愈接近零，表示殘差的變動是隨機的且沒有任何特殊趨勢(trend)或樣式(pattern)出現，模型具可信度；若模型不適當時，殘差值分布會有一趨勢或樣式。另外，統計學中常以常態分佈曲線(normal distribution)來描述一個流程或母群體之可量測特性(measurable characteristics)的隨機行為(random behavior)，應用在地動預估式中，即為檢查誤差是否符合常態分配(normality)，若不呈現常態分配的形狀時，則表示常態性假定已被違反。透過相關的殘差分布圖，可判斷迴歸分析的假定是否合理，供決定是否要採取其他補救或矯正措施，降低預測的誤差，協助檢核地動預估式的合理性。另外，標準差在機率統計中最常使用作為測量一組數值的離散程度之用，在地動預估式中，地動值之殘差的標準差不僅是地震危害度分析中的關鍵因子，亦可在地震預警分析中，代表預估式的評估精準度，一般來說，殘差的標準差小，代表殘差的離散程度小，模型品質良好，可作為模型的初步篩選。

2. 檢量線迴歸分析

迴歸分析為一種解釋自變量(影響因素)與因變量(被解釋之變量)關係的統計分析方法，透過迴歸模型的建立預測與推論欲研究之變數。在地動預估式中，可藉由迴歸分析計算地動參數觀測值與預估值迴歸方程式，再利用方程式得知觀測值與預估值之間的關係。

a. 迴歸方式

本計畫原先使用最小平方法(least squares)進行迴歸，但在計算過程中發現此方法只考慮因變量 Y 存在誤差，由於取樣資料為地動實際觀測值與預估值，兩者皆有可能有誤差存在，產生統計推論偏誤，因此在多次嘗試後改以戴明迴歸(deming regression)分析，此迴歸分析方式同時考慮到因變量 Y 與自變量 X 皆有誤差，另外還包含了因測量方式不同造成變異數不同的可能情況，當變異數比為 1(表示兩者變異數相同)時，戴明迴歸即等於正交迴歸(total least squares)。相較於正交迴歸，戴明迴歸計算的是點到直線的斜距離總和最小值。

b. 地動加速度與速度迴歸

除了各分析參數上的殘差分布，地動預估式觀測值與預估值比較也非常重要，可確認各振幅區間是否皆預估精準。如圖 5-1，藍線代表強震資料使用模型計算出的迴歸線，又稱為檢量線(calibration curve)，表示模型的預測精度，即預測值和觀測值之間的差異程度。灰線為比值一之直線，比值接近一表示該模型計算出的成果與實際情況有相當程度的符合。若迴歸線斜率明顯小於一，在振幅較大之區域觀測值大於預估值，當災害性地震來臨時會造成低估，導致無法準確地進行地震預警。目前地震防救災業務以震度為主要參考依據(內政部，2004)，地震震度愈高愈容易造成災害，一般以震度三級以上作為人員傷亡以及建築物毀損的標準。因此於週期零秒時根據中央氣象署現行震度分級，將震度一到五級的振幅使用 PGA 細分，比較震度三級以上與全震度地震資料之間異同，透過此細分區間可以得知模型在各震度下的表現。此外，根據表 3-3 之分類，研究對象包含 PGV 之模型，會再利用 PGV 將震度五級以上的振幅細分。同時，在確保資料數量足夠的情況下，區分出震度四級以上之地震資料，以達到更準確的預估。

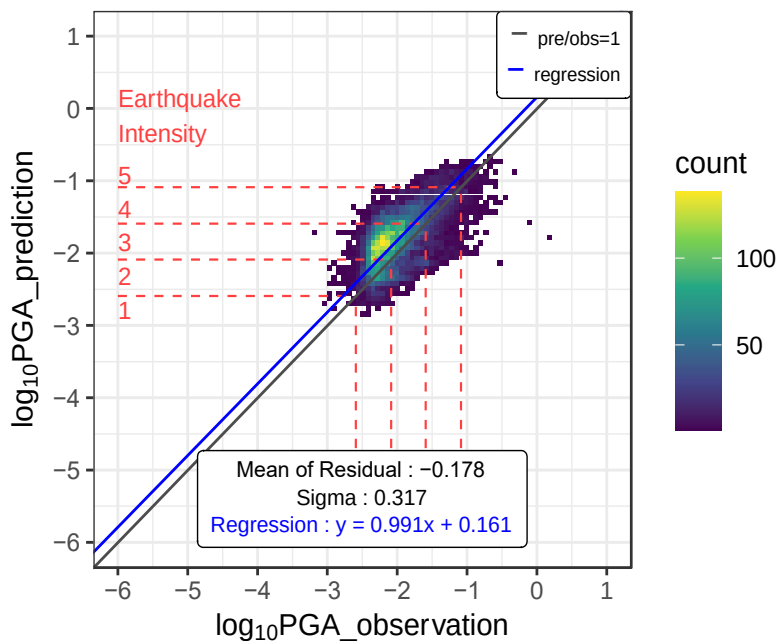


圖 5-1、地動預估式觀測值與預估值比較示意圖

六、研究結果

本計畫收錄國內外共 62 個地動預估模型，依第五章之研究方法計算模型之參數對數殘差，此處對數殘差值係由觀測值與預估值分別取 $\log_{10}$ 後相減得出，對數殘差值對應 PGA、PGV 相差倍數可見表 6-1(後續文章內之對數殘差將以殘差二字論述)，並依據篩選條件在不同地震類型下選擇幾組模型，以說明在參數殘差項目上模型的表現優劣，篩選條件如下：

1. 參數殘差分析圖無特殊趨勢
2. 殘差平均值介於正負 0.300 之間
3. 殘差標準差小於 0.350

若模型之參數殘差不符合篩選條件將不納入可用之模型，當某一地震類型之模型參數殘差皆未達篩選條件，則取參數殘差綜合表現最佳之模型進行後續討論，本計畫經篩選後可用之模型共計 42 個(見附錄 1)。待上述模型篩選完成再依次進行檢量線分析，最後挑選全震度與震度三級以上檢量線表現較優之模型進行討論。本計畫所收錄之模型檢量線分佈圖、殘差比較圖、經篩選後可用之模型列表詳見附錄 2~5。

1. 參數殘差分析

此處將現行地震預警之預估式與本計畫所製作之地動預估模型根據地震類型分為淺部地殼地震(cru)、隱沒帶地震(sub)、界面型隱沒帶地震(sub_inter)及內部型隱沒帶地震(sub_slab)，並以此分類繪製規模、距離、測站場址殘差分佈圖。

a. 現行地震預估式

規模項與距離項之殘差分佈圖中，如果殘差分布的形狀呈現隨機且水平的分布狀態，那麼可以表示迴歸分析模型良好。現行地震預估式(蕭乃祺，2007)之殘差值與規模的分布顯示如圖 6-1、6-2、6-3、6-4，藍線代表整體資料的趨勢線，紅色虛線代表整體資料的平均值，黑色虛線代表殘差值為零的直線。在規模項的部分，模型 Hsiao2007 的殘差普遍均勻分布於零線兩側，且殘差平均值皆小於 0.1，標準差也足夠小，表示模型具有可信度。在震源距離方面，除隱沒帶內部型地震，其餘三者都有些微左低右高的趨勢，代表淺部地震發生時可能會有預測誤差。

b. 淺部地殼地震

淺部地殼地震模型殘差平均值介於-0.351~0.506，標準差介於 0.267~0.453。以模型表現來說，AC10(圖 6-5 右側)殘差平均值為 0.506，整體上殘差呈現正向分佈的趨勢，在小規模(3~5)、淺層地震(30 公里以內)、地層為鬆軟土壤時尤為明顯，規模與測站場址項的趨勢線也顯示出該模型存在左低右高的分佈情形。其標準差

為 0.453，資料點彼此之間較為分散，根據第五章所述之篩選條件，模型 AC10 不符合本研究所需，將不納入接下來的檢量線討論。而模型 I14.tw.C01(圖 6-5 左側)，除了距離項在震源深度大於 300 公里處殘差分佈稍有偏離零線外，其餘規模、距離、場址等方面的殘差都均勻地分布在零線的正負兩側，整體平均值為-0.088。此外，標準差為 0.277，表示殘差的離散度較小，資料點彼此之間非常接近，相比之下具有較高的一致性和可靠性。

c. 隱沒帶地震

隱沒帶地震類型殘差平均值介於-0.507~0.010，標準差介於 0.272~0.434，多數模型殘差有負向分佈的趨勢。以 LL08.F04 和 LL08(圖 6-6)為例，模型 LL08.F04 的殘差平均值為-0.178，標準差為 0.317;而模型 LL08 殘差平均值為-0.251，標準差為 0.272。就規模、距離、場址三種參數的殘差來說，此二模型的分佈情形並無太大差異，儘管 LL08.F04 的資料點相對分散，但其殘差平均值較接近零，表示該模型的擬和程度較好，預測的可信度也相對較高。

d. 隱沒帶界面型地震

隱沒帶界面型地震類型殘差平均值介於-0.796~0.167，標準差介於 0.275~0.425。表現較好的模型如 Arroyo2010(圖 6-7 左側)，其殘差平均值為 0.045，標準差為 0.306;表現較差的模型如 AM09(圖 6-7 右側)，殘差平均值為-0.796，標準差為 0.425。兩者在規模與距離項上的趨勢相似，且從趨勢線可以看出規模項的殘差都有左低右高的分佈，距離項的殘差在震源深度超過 100 公里時明顯往正向的方向移動，顯示這兩個模型在深部地震的預測上可靠度較低。另外，Arroyo2010 於模型建置時已預設場址為堅硬地盤(National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP B class)，AM09 則為 $V_{s30}=760$ m/s(NEHRP B/C boundary)，由於這兩個模型所輸入的參數並不包含測站場址項，此處暫不進行討論。綜合來說，模型 AM09 不論是在平均值或資料趨勢上皆不符合篩選條件，將不採納進可用模型當中，而 Arroyo2010 則因殘差平均值非常接近零，表示該模型在其餘震源深度仍然存在一定的可信度。

e. 隱沒帶內部型地震

隱沒帶內部型地震類型殘差平均值介於-0.643~-0.292，標準差介於 0.259~0.331，所有模型之殘差皆為負向分佈。模型 Chao20(圖 6-8 左側)的殘差平均值為-0.293，均勻的分佈在平均值正負兩側之外，迴歸線也顯示無特定趨勢，是內部型當中表現較為優秀的模型。相較之下，Zh16Slab(圖 6-8 右側)更為負向分佈，其平均值已掉到-0.643，幾乎所有資料皆在零線的下方，不符合第五章所述之篩選條件，因此也不納入可用模型。

2. 檢量線迴歸分析

a. 地動加速度迴歸

圖 6-9 為模型 Hsiao2007 全震度下 PGA 觀測值與預估值比較，淺部地殼地震與隱沒帶界面型地震迴歸線斜率分別為 1.112 和 1.110，與斜率一之灰線相比整體有稍微向預估值偏的趨勢，在大振幅處會有高估的情形出現。若以震度細分，迴歸線與灰線相交處為震度二級，可能導致預測震度已達災害性地震，實際卻未有災情之情況。而隱沒帶及內部型地震模型斜率為 0.989、0.935，在有可能造成災情的震度下兩者的迴歸線與灰線有高度的重疊，表示在這兩種地震類型下可以很有效的預測。而震度三級以上之地震資料在四種地震類型的迴歸線斜率分別為 1.263、1.238、1.366、1.160(圖 6-10)，顯示出模型 Hsiao2007 在大振幅處皆有高估的可能。

淺部地殼地震以模型 I14.tw.C01 為例(圖 6-11)，模型 I14.tw.C01 迴歸線之斜率為 0.968，預估值偏小但從圖中可以看出迴歸線在高震度區貼近比值一之直線。若觀察震度區間(紅色虛線)，可以看到在震度四到五級以上有較好的表現，與實際情形較符合，而震度三級以下稍微有低估的情況出現。而此模型若只保留震度三級以上之資料，迴歸線斜率會更為接近 1，其值為 1.007，表示該模型除去小振幅地震後可有效預測地動值，模型可靠度高。

除了淺部地殼地震外，本研究也挑選了幾個適用於隱沒帶地震的模型，而隱沒帶地震又可分為界面型與內部型，同樣各取兩個模型進行分析。在隱沒帶地震類型，選擇了 LL08.F04 與 PhungSub20(圖 6-12)；界面型類型選擇 Arroyo2010 與 Zh06(圖 6-13)；內部型則是 Chao20(圖 6-14)。在這三種類型中，LL08.F04、Arroyo2010 和 Chao20 為全震度地震資料下之檢量線圖，迴歸線斜率分別為 0.991、1.015 和 0.816，其中又以 Arroyo2010 為最佳，從圖中可以看出迴歸線幾乎與斜率為一的黑直線重疊，模型精確度高，具有很好的預測功能。模型 Chao20 雖然在內部型分類中算是較好的，但成果也不是很理想，除了大振幅外，小振幅的預估值都明顯偏大。將震度三級以上地震篩選出來後，較好的模型為 PhungSub20、Zh06、Chao20，斜率分別為 1.045、0.915 和 0.984，三者皆與全震度下模型有所差異，特別在內部型模型 Chao20 中，迴歸線斜率由 0.816 轉變為 0.984，整體斜率趨近於一。目前震度三級以下地震在地震防救災業務上屬於非主要參考依據，由上述結果可知小振幅區間因資料量龐大，易影響地動預估式在致災震度下的判斷，因此下一章只採用震度三級以上地震資料進行模型挑選，以達到更符合需求的地震預警評估。

b. 地動速度迴歸

根據前一小節觀察得到之結果，此處地動速度模型僅使用震度大於四級以上的地震資料。模型 Hsiao2007 的地動速度檢量線如圖 6-15 所示，其在淺部地殼、隱沒帶、隱沒帶界面型、隱沒帶內部型地震之檢量線斜率為 1.836、2.450、1.436、1.066。除隱沒帶內部型地震表現較好外，其餘兩者皆顯示出預估值與觀測值有明顯落差(圖 6-16)，且隱沒帶內部型地震資料數量不足，未來須再蒐集更多相關資料。

本計畫所使用之地動預估模型經參數殘差分析篩選後，包含 PGV 的模型共 6

組，分別為 BI14、BSSA14、KAAH15、Shoushtari18、SI1999 以及 Stewart16，其中有 5 組適用於淺部地殼地震(圖 6-17)，BSSA14 為檢量線圖中表現最好的模型，斜率為 1.002、截距為-0.196，截距項經過修改即可得到很好的成果。隱沒帶在三種地震類型下可使用之模型共 2 組，只有內部型模型 SI1999 檢量線斜率較接近一(0.968)，其餘模型皆不具有預測能力。因此針對隱沒帶類型地震，若有新的地動速度相關研究，則會建立適合臺灣地區新的預估式。

表 6-1、殘差對應之 PGA、PGV 相差倍數

殘差	PGA、PGV 倍數	殘差	PGA、PGV 倍數
-0.01	0.98	0.01	1.02
-0.02	0.95	0.02	1.05
-0.05	0.82	0.05	1.22
-0.1	0.79	0.1	1.26
-0.2	0.63	0.2	1.59
-0.3	0.50	0.3	1.99
-0.4	0.40	0.4	2.51
-0.5	0.32	0.5	3.16
-0.6	0.25	0.6	3.98
-0.7	0.20	0.7	5.01
-0.8	0.16	0.8	6.31
-0.9	0.13	0.9	7.94
-1	0.1	1	10

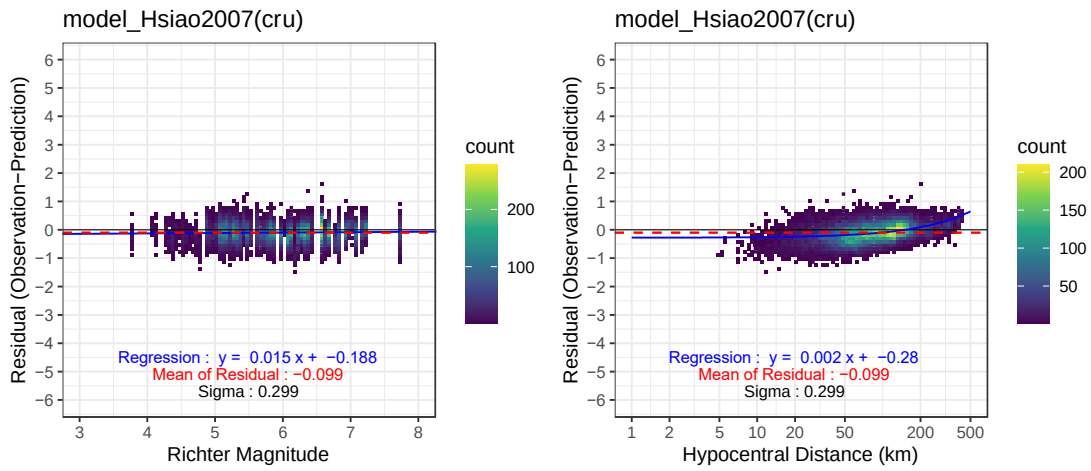


圖 6-1、現行地動預估式於規模與距離上的參數殘差分佈
(淺部地殼地震)

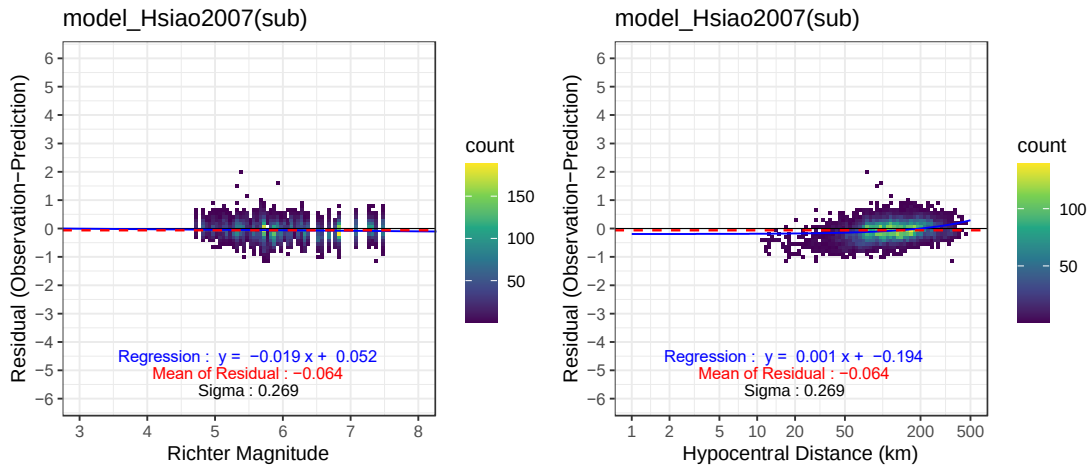


圖 6-2、現行地動預估式於規模與距離上的參數殘差分佈
(隱沒帶地震)

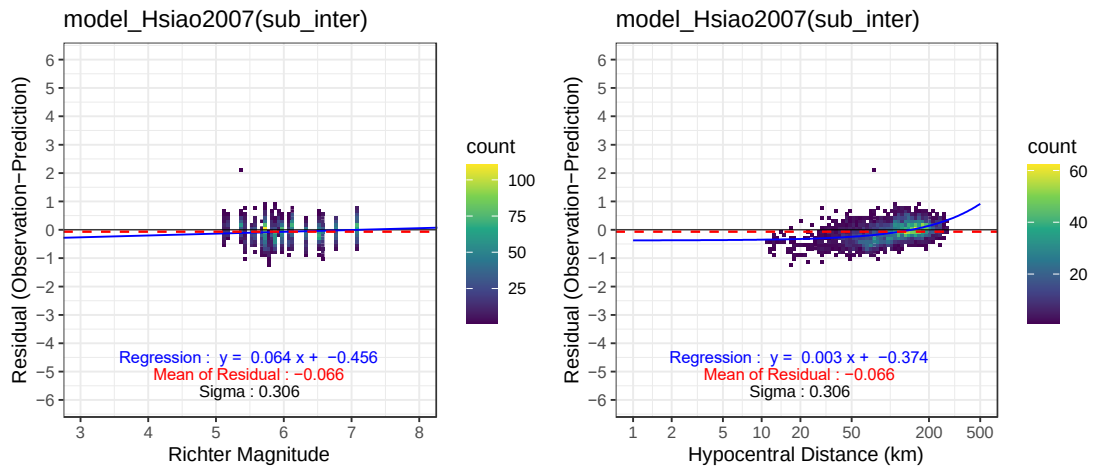


圖 6-3、現行地動預估式於規模與距離上的參數殘差分佈
(隱沒帶界面型地震)

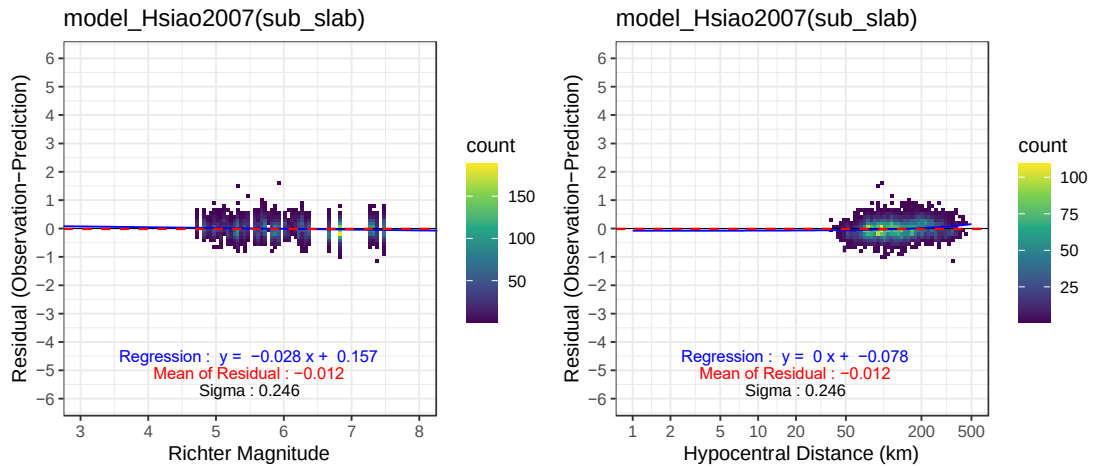


圖 6-4、現行地動預估式於規模與距離上的參數殘差分佈
(隱沒帶內部型地震)

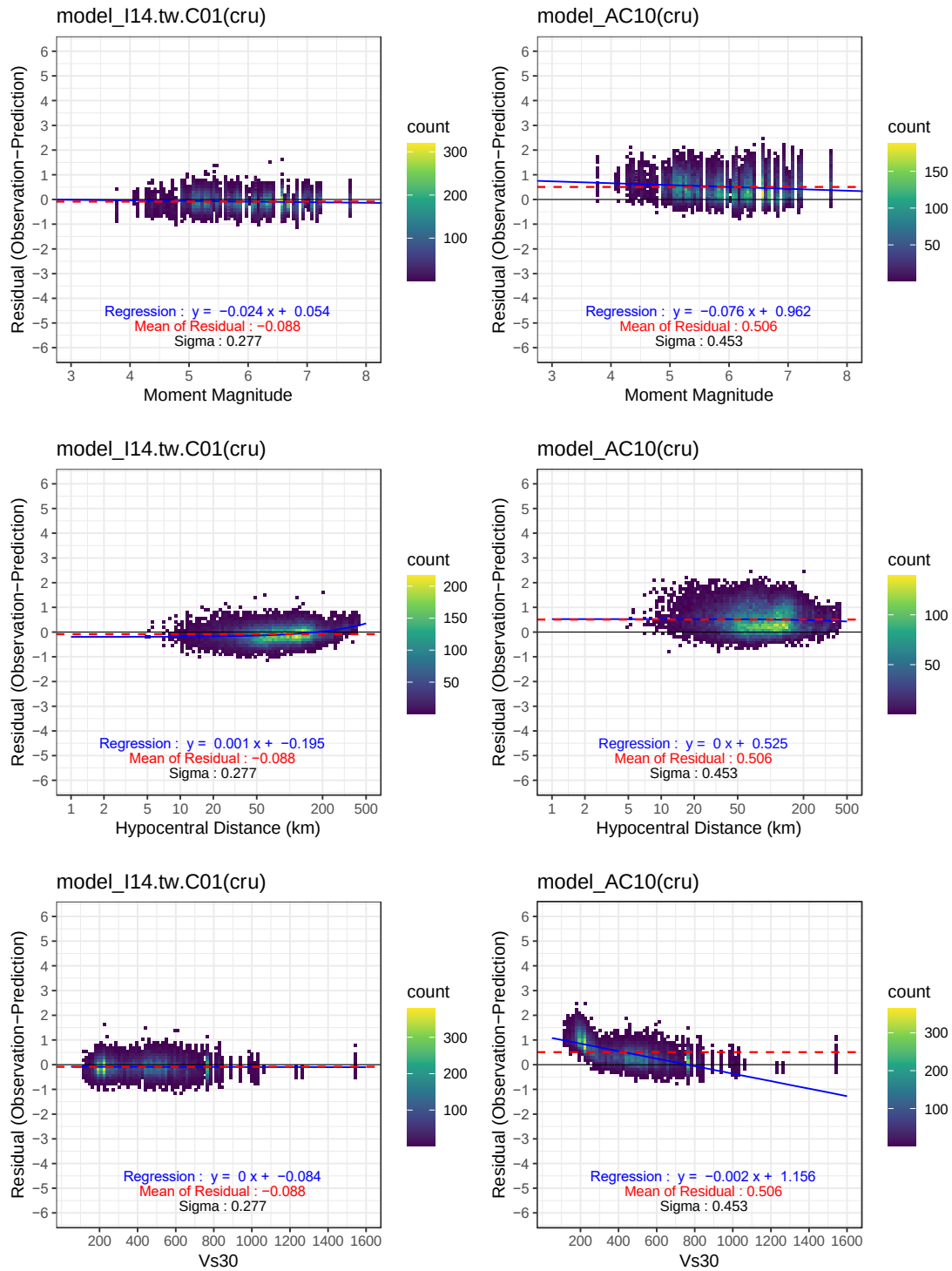


圖 6-5、地動預估式 I14.tw.C01 與 AC10 於規模、距離與測站場址上的參數
殘差分佈
(淺部地殼地震)

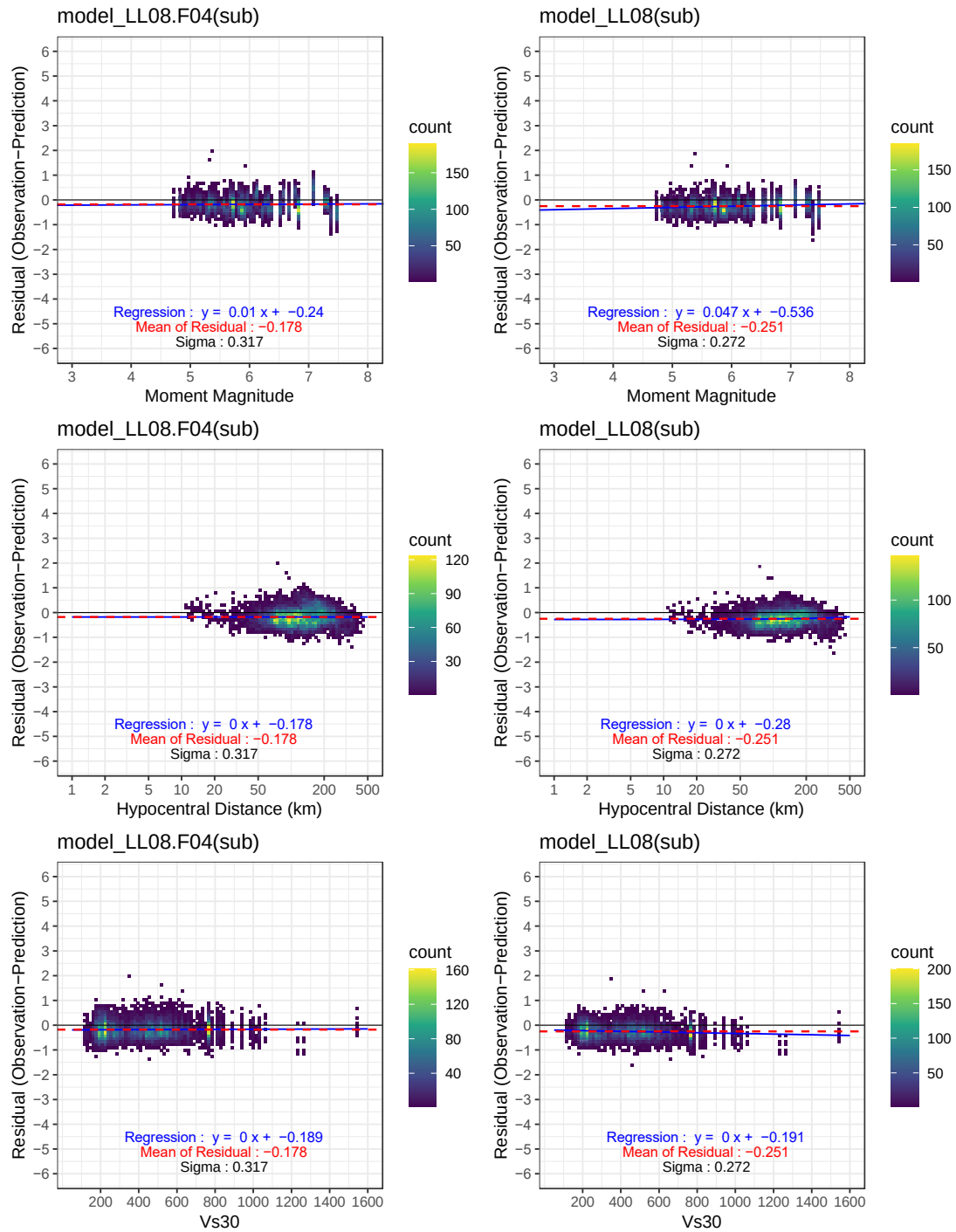


圖 6-6、地動預估式 LL08.F04 與 LL08 於規模、距離與測站場址上的參數

殘差分佈

(隱沒帶地震)

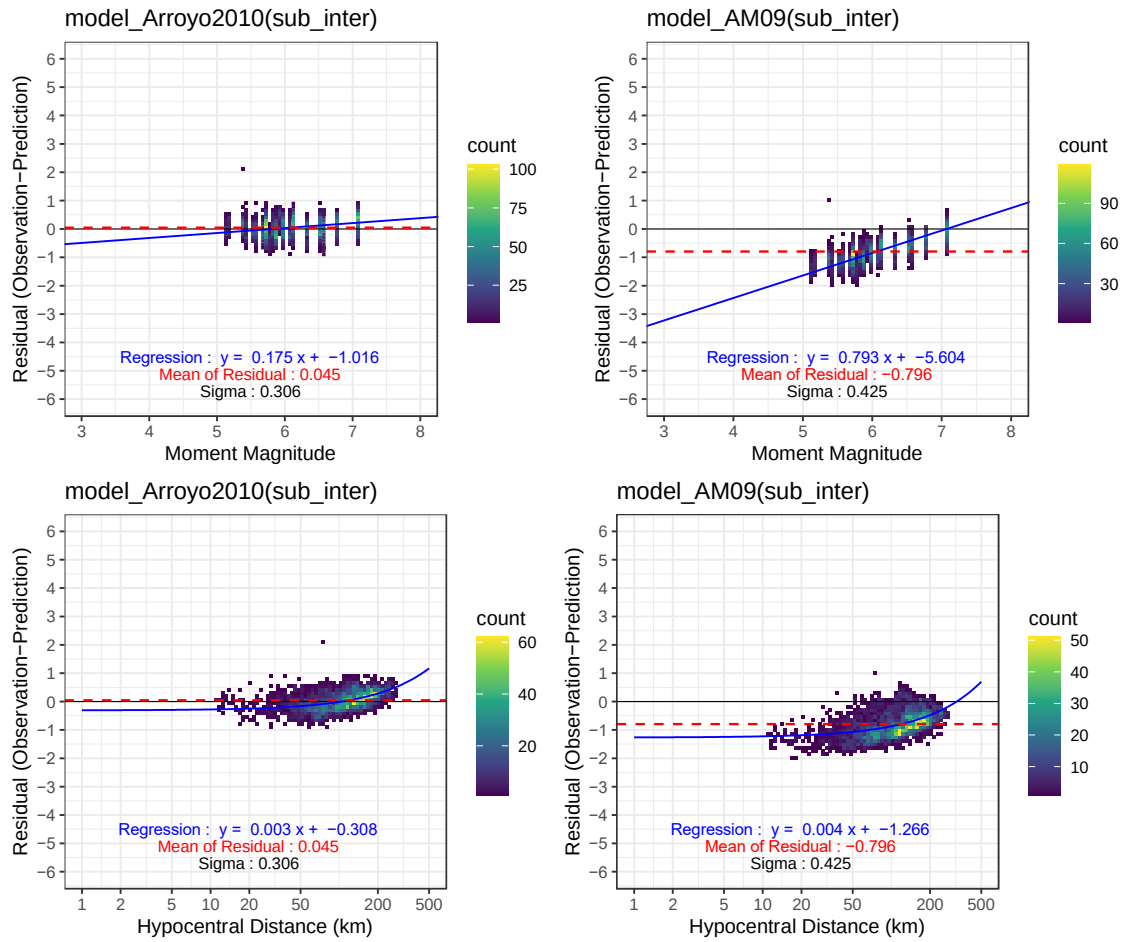


圖 6-7、地動預估式 Arroyo2010 與 AM09 於規模與距離上的參數殘差分佈
(隱沒帶界面型地震)

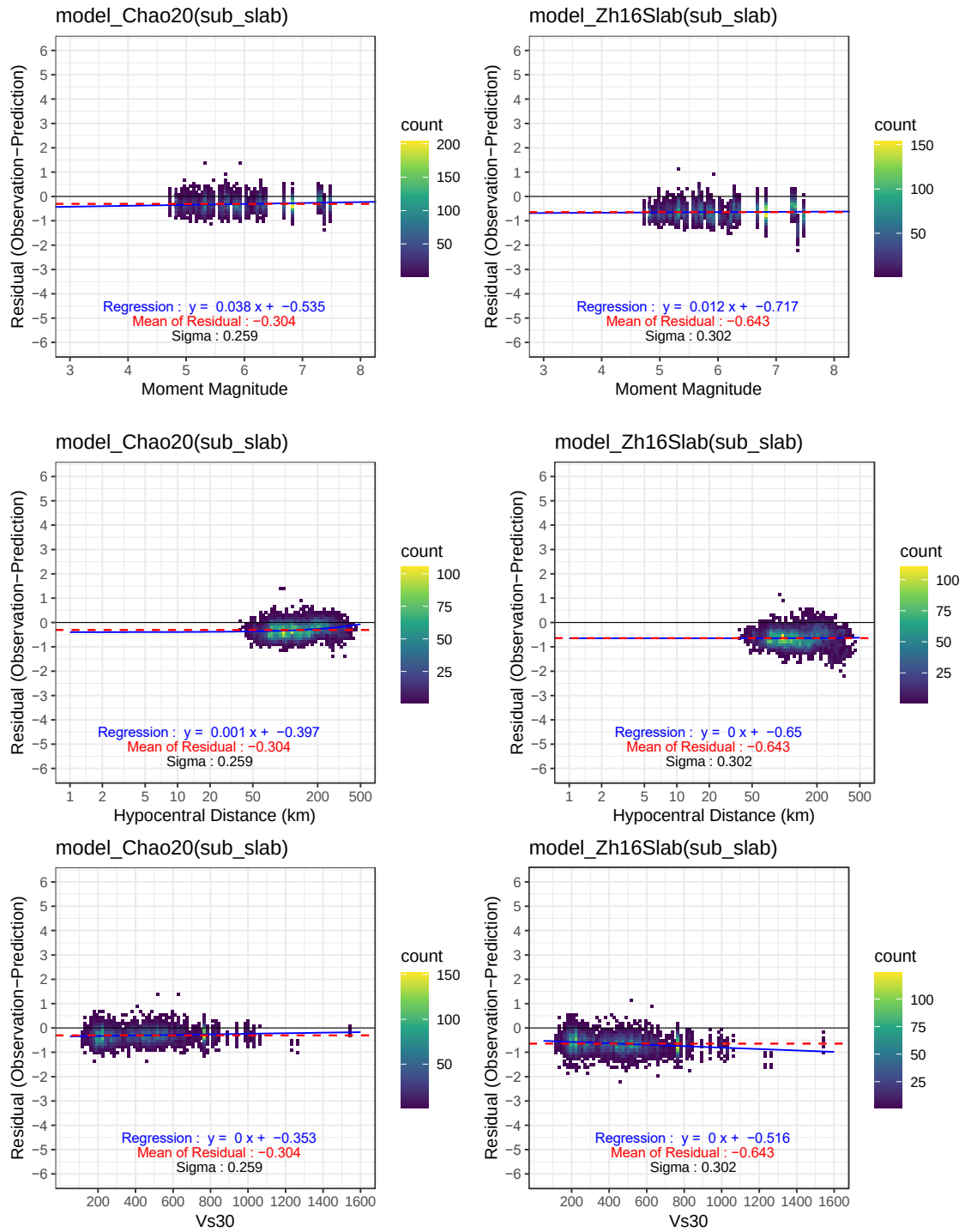


圖 6-8、地動預估式 Chao20 與 Zh16Slab 於規模、距離與測站場址上的參數

殘差分佈

(隱沒帶內部型地震)

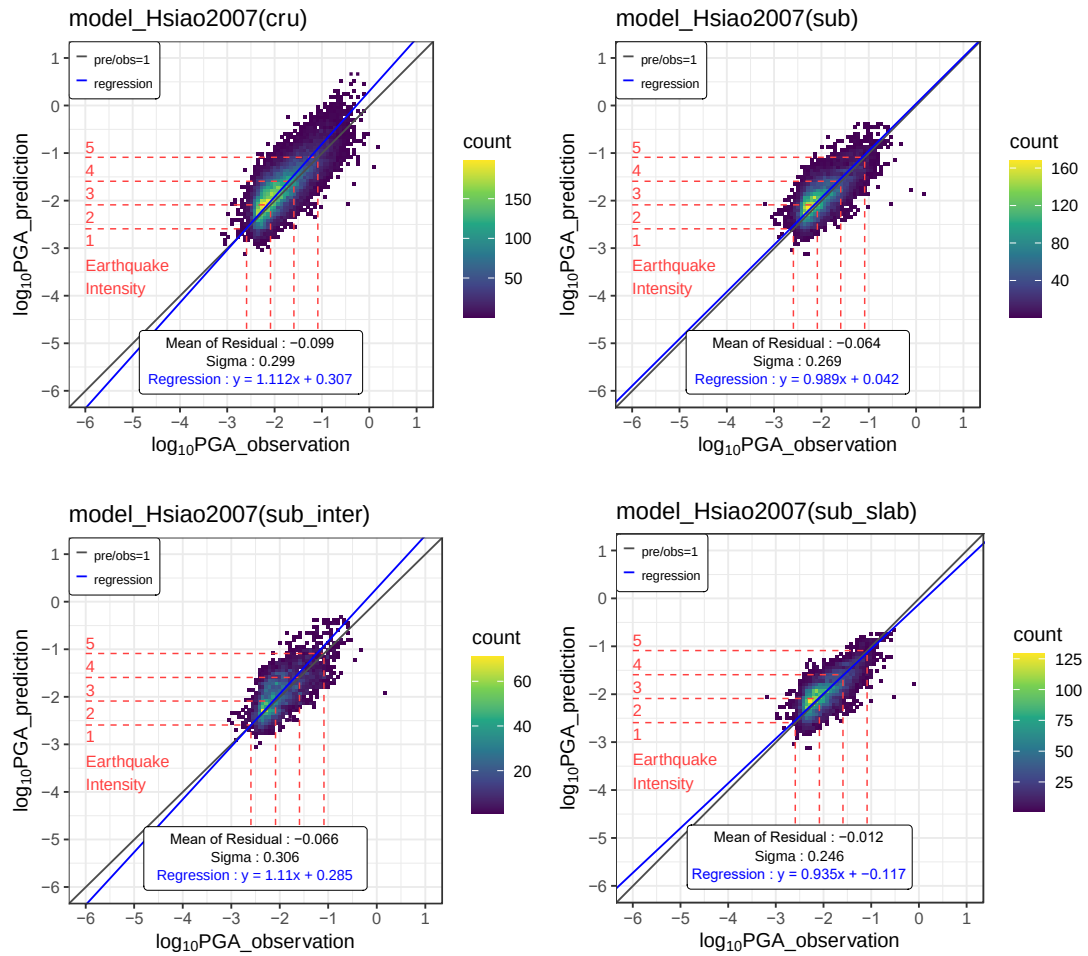


圖 6-9、現行地動預估式之 PGA 預估值與觀測值比較圖
(全震度地震資料)

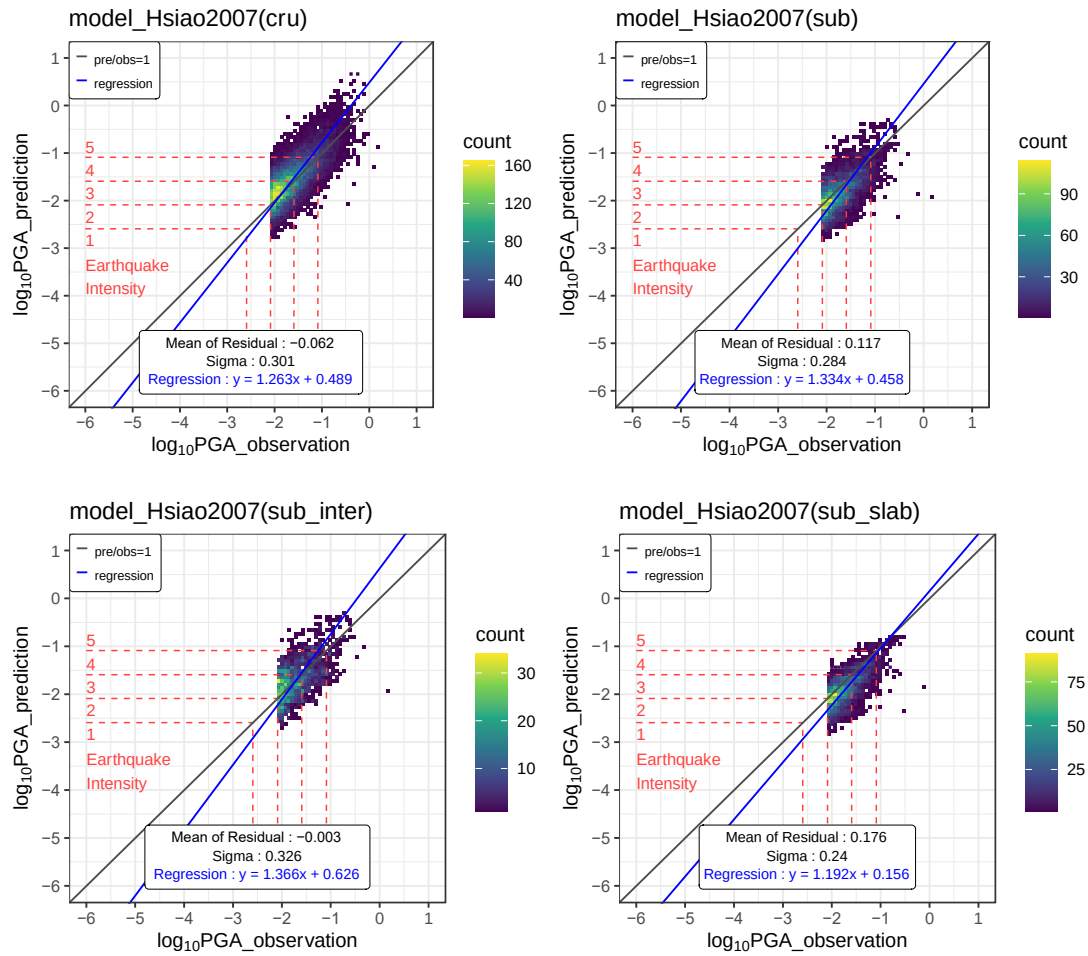


圖 6-10、現行地動預估式之 PGA 預估值與觀測值比較圖
(震度三級以上地震資料)

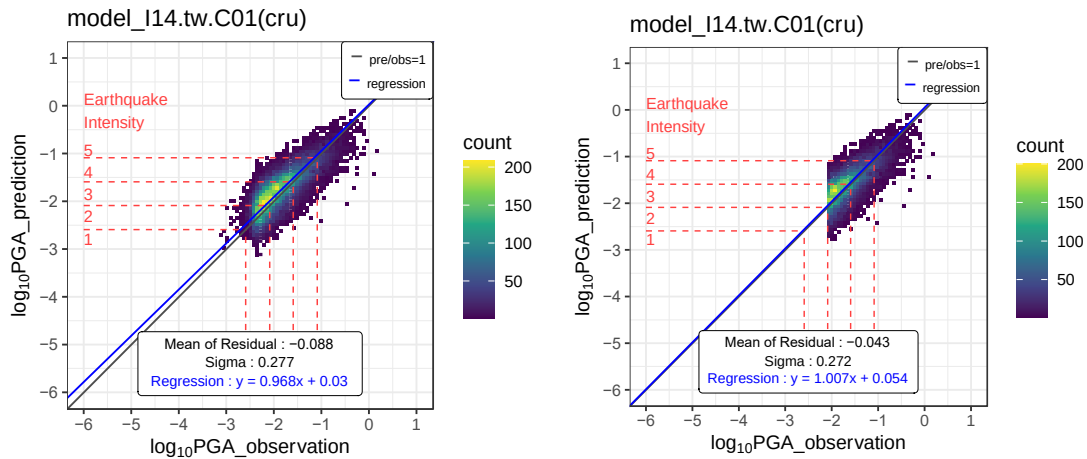


圖 6-11、地動預估式之 PGA 預估值與觀測值比較圖(淺部地殼地震)

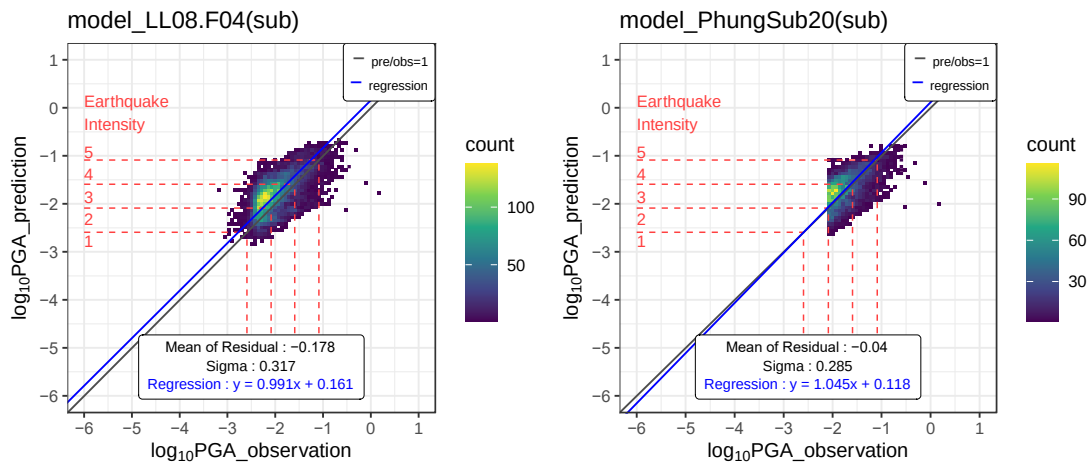


圖 6-12、地動預估式之 PGA 預估值與觀測值比較圖(隱沒帶地震)

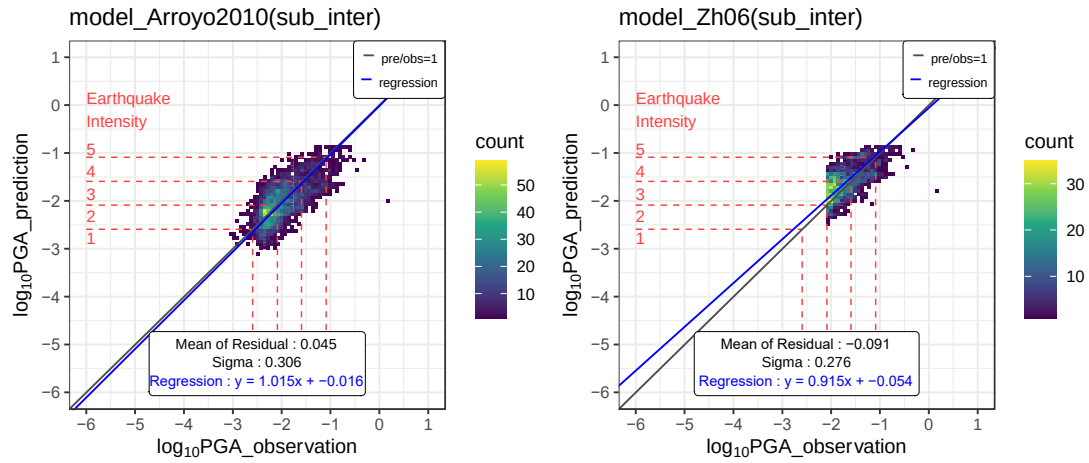


圖 6-13、地動預估式之 PGA 預估值與觀測值比較圖(隱沒帶界面型地震)

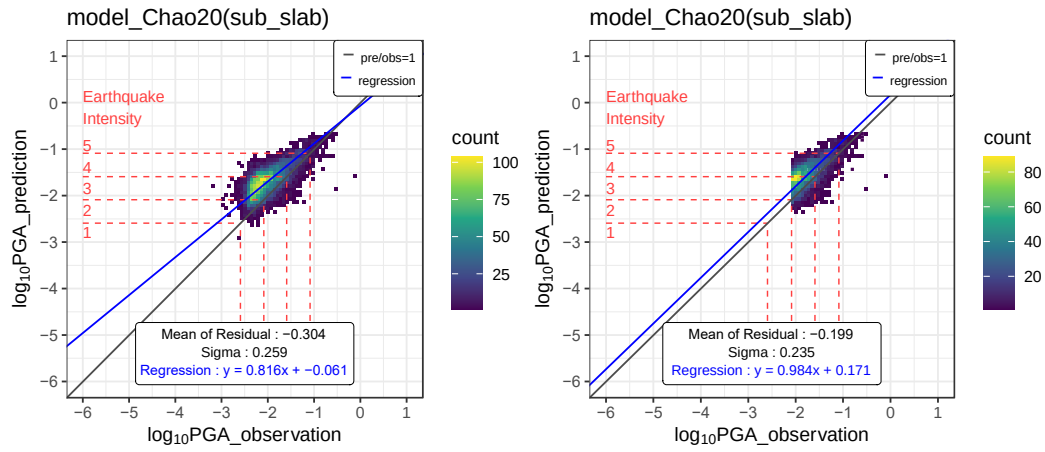


圖 6-14、地動預估式之 PGA 預估值與觀測值比較圖(隱沒帶內部型地震)

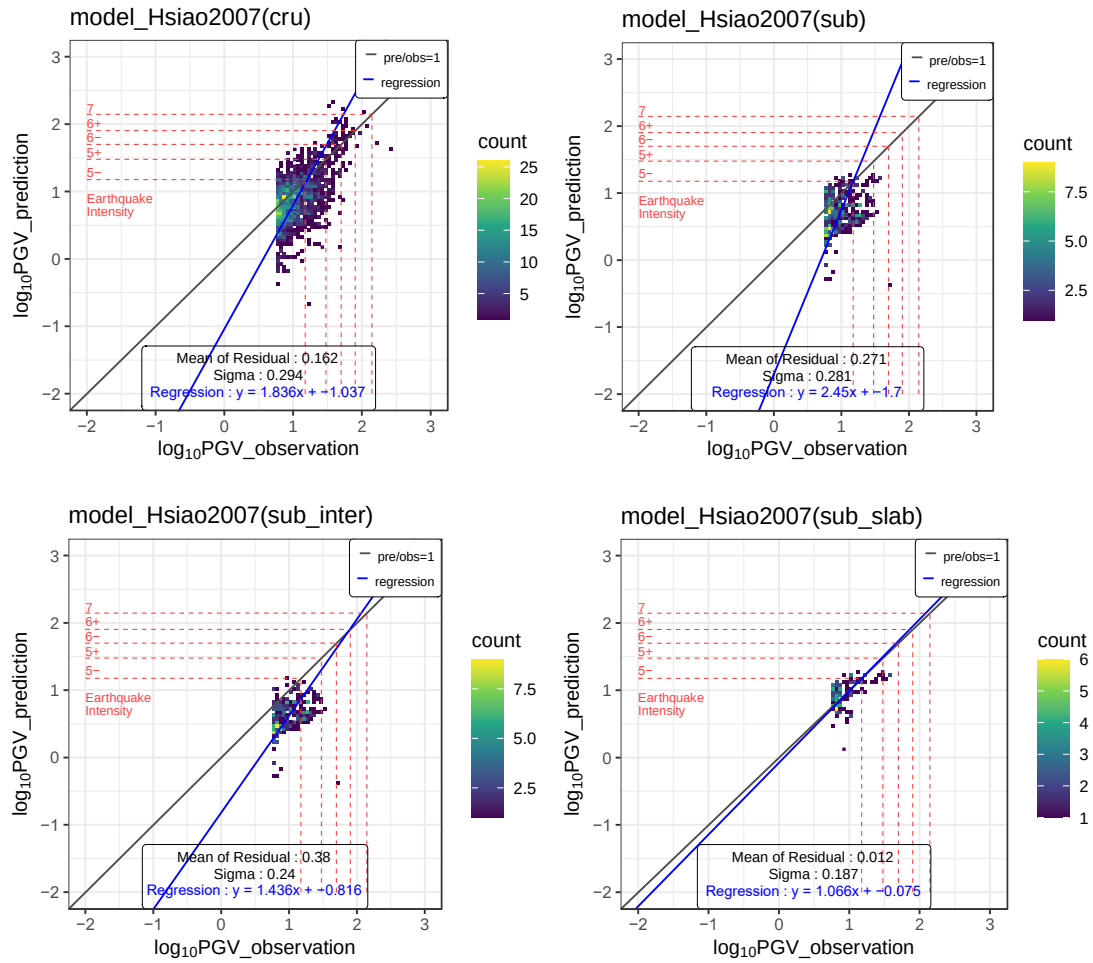


圖 6-15、現行地動預估式之 PGV 預估值與觀測值比較圖

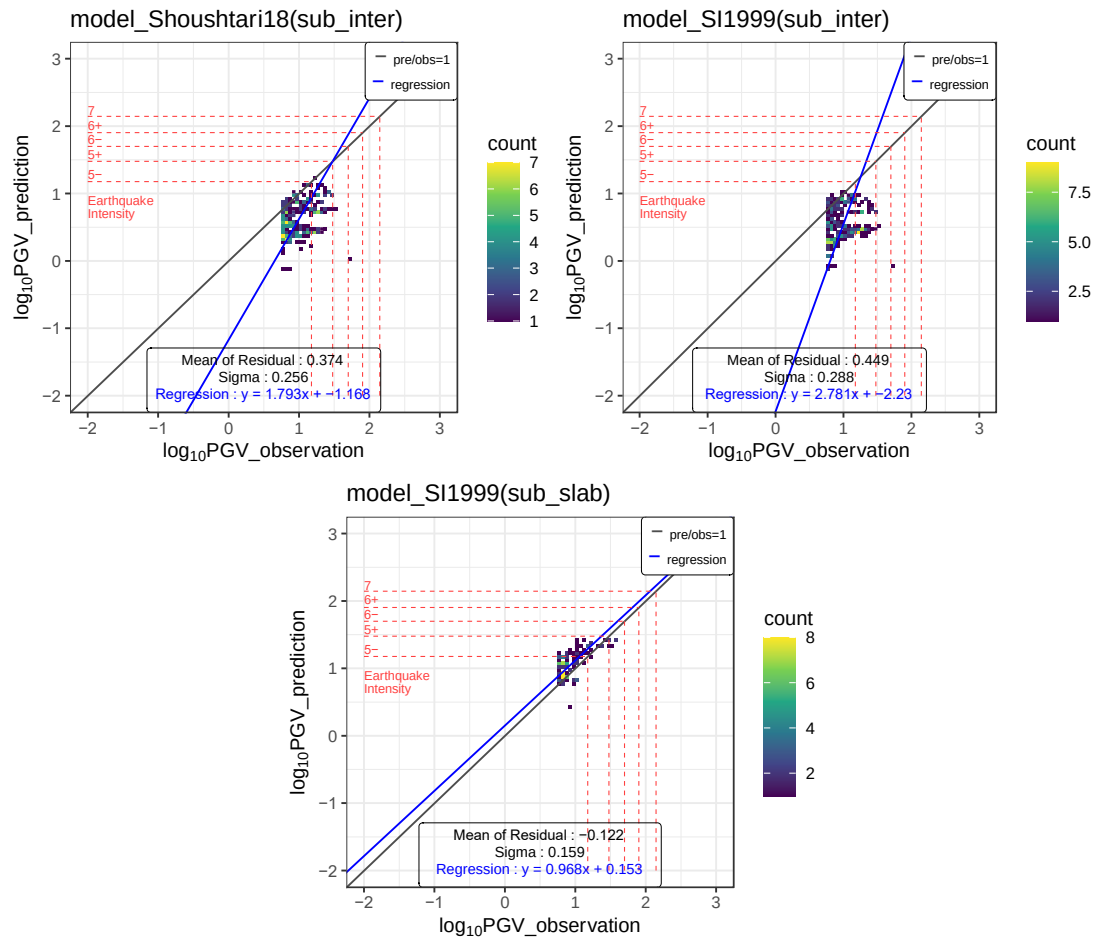


圖 6-16、地動預估式之 PGV 預估值與觀測值比較圖
(隱沒帶界面型及內部型類型地震)

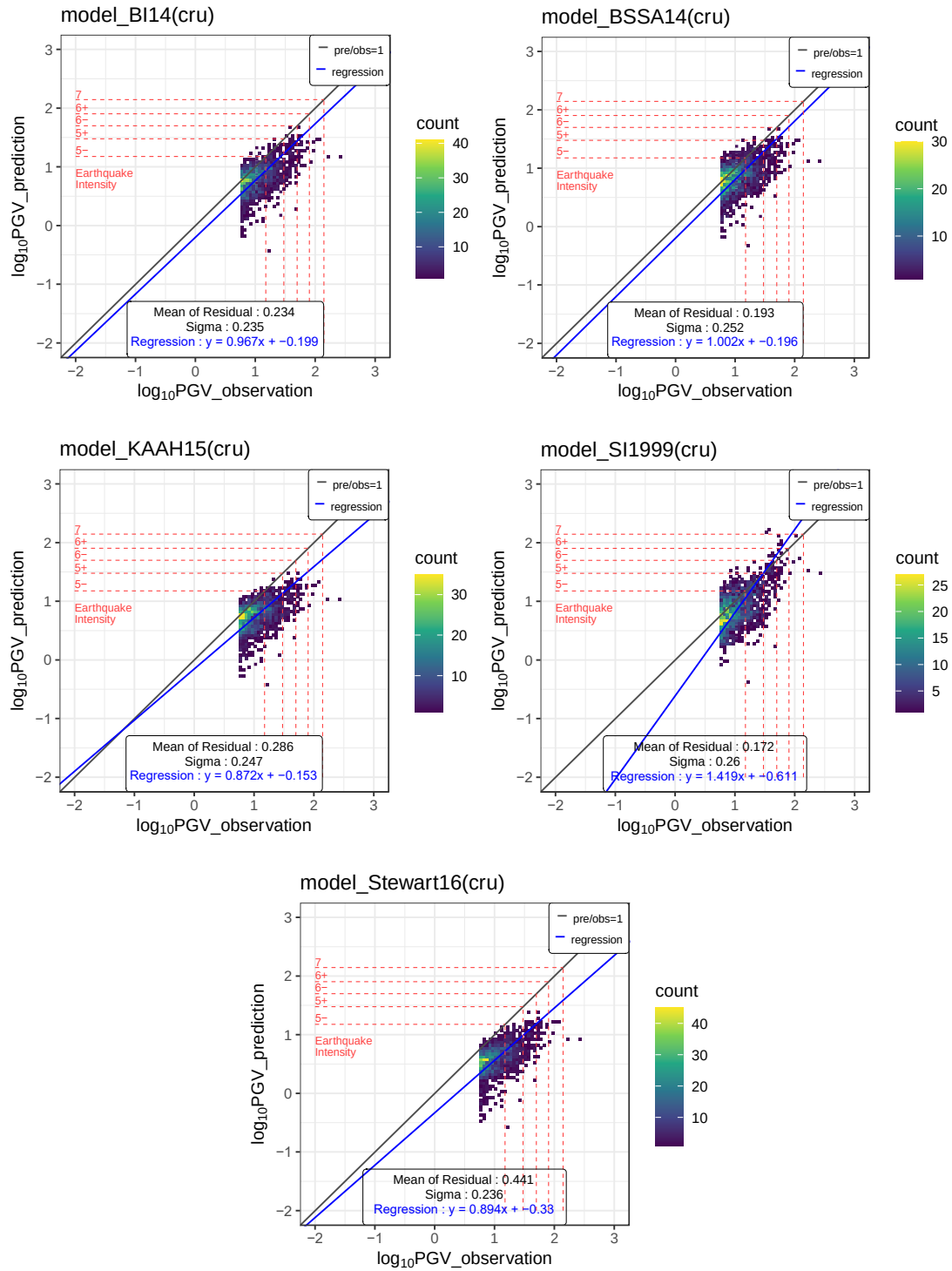


圖 6-17、地動預估式之 PGV 預估值與觀測值比較圖(淺部地殼地震)

七、討論

本計畫經過參數殘差分析篩選符合線性假設的地動預估模型後，挑選出各地震類型下表現優良的與現行中央氣象署經驗預估式進行比較，整理成表 7-1、表 7-2、表 7-3、表 7-4，並根據三項數值來排序模型，包括殘差平均值、殘差標準差和檢量線迴歸線斜率，排序條件如下：

(1) 殘差平均值(Mean.of.residual)愈趨近零

(2) 殘差標準差(Sigma)愈小

(3) 檢量線迴歸線斜率(PGA_Regression_b、PGV_Regression_b)愈趨近一

淺部地殼地震類型中，模型 I14.tw.C01(Idriss, 2014)表現相當接近標準值，與模型 Hsiao2007(蕭乃祺, 2007)相比，不論是在全震度或者是震度三級以上地震，其地動加速度檢量線皆更趨近於一，表示災害性地震來臨時可以更準確的預測(圖 7-1)。

隱沒帶地震 LL08.F04(Lin and Lee, 2008)與 Hsiao2007 這兩者在全震度下的檢量線表現十分優秀，修改截距項後幾乎能與比值一之黑直線重合，無低估或過估的情況發生。而震度三級以上的地震模型 PhungSub20 (Phung et al., 2020)斜率的表現雖不及 LL08.F04，但與 Hsiao2007 相比大振幅處高估的情形明顯減少許多，可適用於臺灣隱沒帶地震(圖 7-2)。

在隱沒帶界面型地震 Arroyo2010(Arroyo et al., 2010)、Zh06(Zhao et al., 2006)與 Hsiao2007 的比較中，模型 Arroyo2010 屬於全震度，Zh06 為震度三級以上地震，這兩者檢量線的斜率都優於 Hsiao2007，分別為 1.015、0.915 及 1.110，並且可於圖中得知新一代地動預估式大振幅處的資料相對集中(圖 7-3)。

隱沒帶內部型地震在兩種震度分類下皆屬 Chao20(Chao et al., 2020)表現佳，其受小震度地震影響無法準確預測，將小地震去除後檢量線斜率即漸趨於一，相較 Hsiao2007 斜率 1.160 可以更準確地預測地震振幅，也較少過估或低估的情況發生(圖 7-4)。

另外在地動速度方面，地動速度對於高震度災害預警具有更精確的預測能力，對於地震災害預警也非常重要。本計畫所收錄之模型 AC10(Akkar and Çağnan, 2010)由於參數殘差並不符合線性迴歸假設，已從可用模型當中剔除，剩餘之地動速度模型共 6 個。淺部地殼排名最好的是 BSSA14(Boore et al., 2014)，檢量線斜率為 1.002，而氣象署模型 Hsiao2007 則高達 1.836，與觀測值有明顯落差(圖 7-5)。隱沒帶唯有內部型 SI1999(SI and Midorikawa, 1999)表現較佳，剩餘隱沒帶地震類型因模型數量不足尚有改進空間，須再進行進一步的搜尋。

表 7-1、淺部地殼地動預估式之殘差平均值、殘差標準差及地動加速度迴歸線

斜率比較表

(由上至下依序為新一代地動預估全震度模型、現行預估全震度模型、新一代地動預估震度三級以上模型、現行預估震度三級以上模型)

Model	EQ_type	Mean.of.Residual	Sigma	PGA_Regression_b
I14.tw.C01	cru	-0.088	0.277	0.968
Hsiao2007	cru	-0.099	0.299	1.112
I14.tw.C01	cru	-0.043	0.272	1.007
Hsiao2007	cru	-0.062	0.301	1.263

表 7-2、隱沒帶地動預估式之殘差平均值、殘差標準差及地動加速度迴歸線

斜率比較表

(由上至下依序為新一代地動預估全震度模型、現行預估全震度模型、新一代地動預估震度三級以上模型、現行預估震度三級以上模型)

Model	EQ_type	Mean.of.Residual	Sigma	PGA_Regression_b
LL08.F04	sub	-0.178	0.317	0.991
Hsiao2007	sub	-0.064	0.269	0.989
PhungSub20	sub	-0.040	0.285	1.045
Hsiao2007	sub	0.016	0.284	1.238

表 7-3、隱沒帶界面型地動預估式之殘差平均值、殘差標準差及地動加速度

迴歸線斜率比較表

(由上至下依序為新一代地動預估全震度模型、現行預估全震度模型、新一代地動預估震度三級以上模型、現行預估震度三級以上模型)

Model	EQ_type	Mean.of.Residual	Sigma	PGA_Regression_b
Arroyo2010	sub_inter	0.045	0.306	1.015
Hsiao2007	sub_inter	-0.066	0.306	1.110
Zh06	sub_inter	-0.091	0.276	0.915
Hsiao2007	sub_inter	-0.003	0.326	1.366

表 7-4、隱沒帶內部型地動預估式之殘差平均值、殘差標準差及地動加速度

迴歸線斜率比較表

(由上至下依序為新一代地動預估全震度模型、現行預估全震度模型、新一代地動預估震度三級以上模型、現行預估震度三級以上模型)

Model	EQ_type	Mean.of.Residual	Sigma	PGA_Regression_b
Chao20	sub_slab	-0.304	0.259	0.816
Hsiao2007	sub_slab	-0.012	0.246	0.935
Chao20	sub_slab	-0.199	0.235	0.984
Hsiao2007	sub_slab	0.070	0.240	1.160

表 7-5、淺部地殼地動預估式之殘差平均值、殘差標準差及地動速度

迴歸線斜率比較表

Model	EQ_type	Mean.of.Residual	Sigma	PGV_Regression_b
BI14	cru	0.234	0.235	0.967
BSSA14	cru	0.193	0.252	1.002
KAAH15	cru	0.286	0.247	0.872
SI1999	cru	0.172	0.260	1.419
Stewart16	cru	0.441	0.236	0.894
Hsiao2007	cru	0.162	0.294	1.836

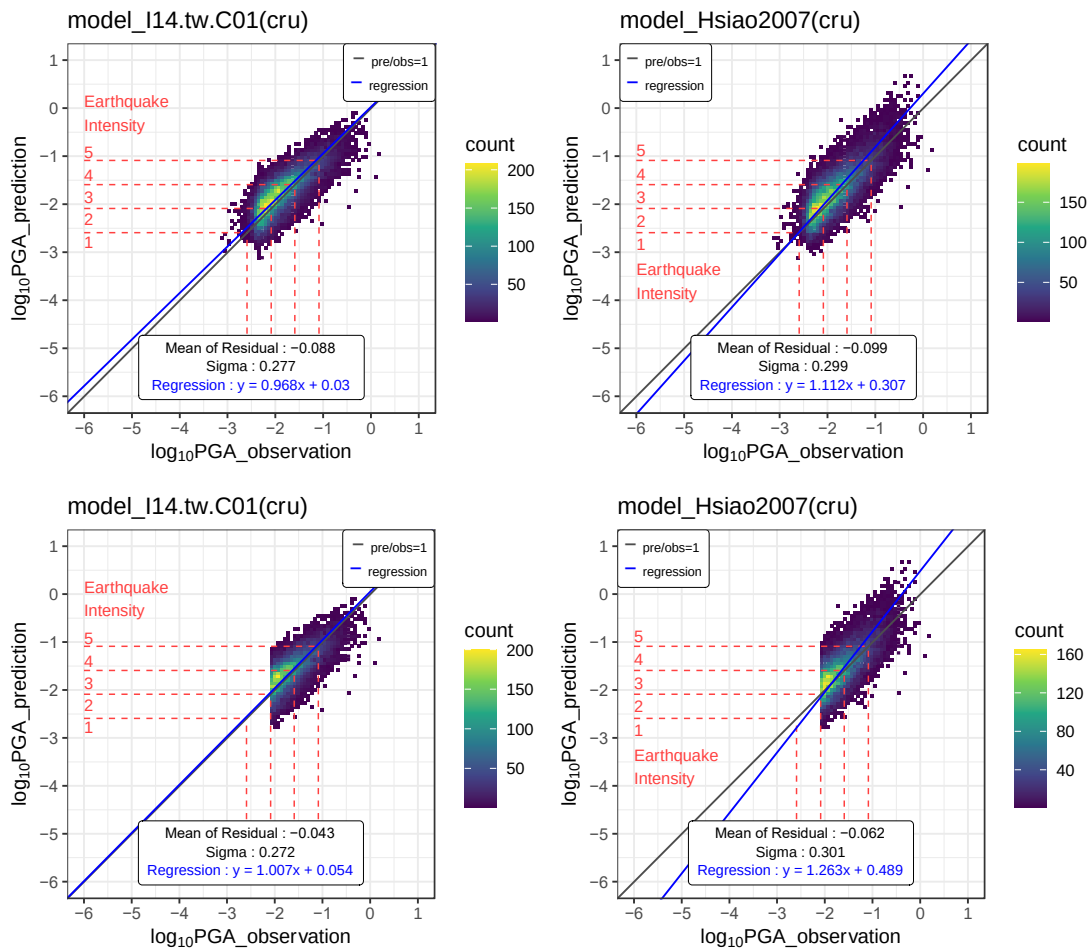


圖 7-1、新一代地動預估式與 Hsiao2007 之 PGA 比較圖
(淺部地殼地震)

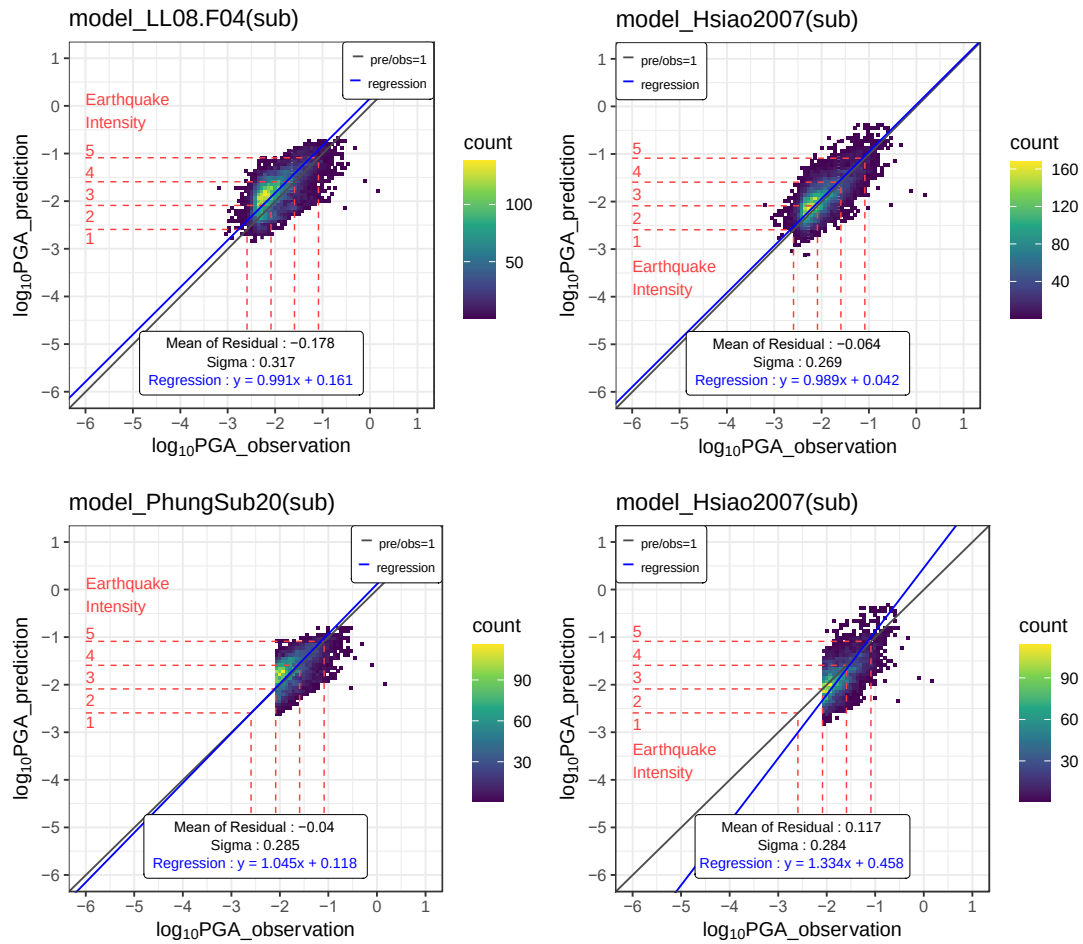


圖 7-2、新一代地動預估式與 Hsiao2007 之 PGA 比較圖
(隱沒帶地震)

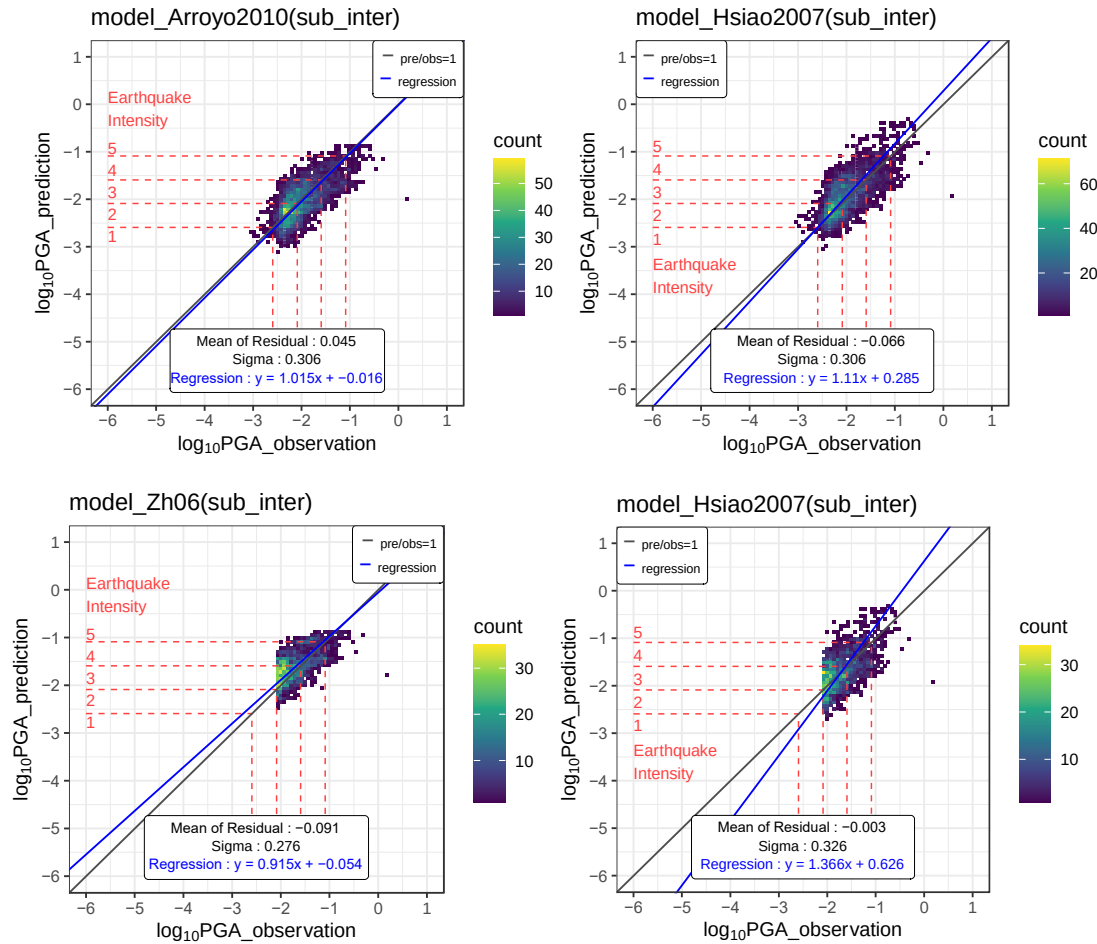


圖 7-3、新一代地動預估式與 Hsiao2007 之 PGA 比較圖

(隱沒帶界面型地震)

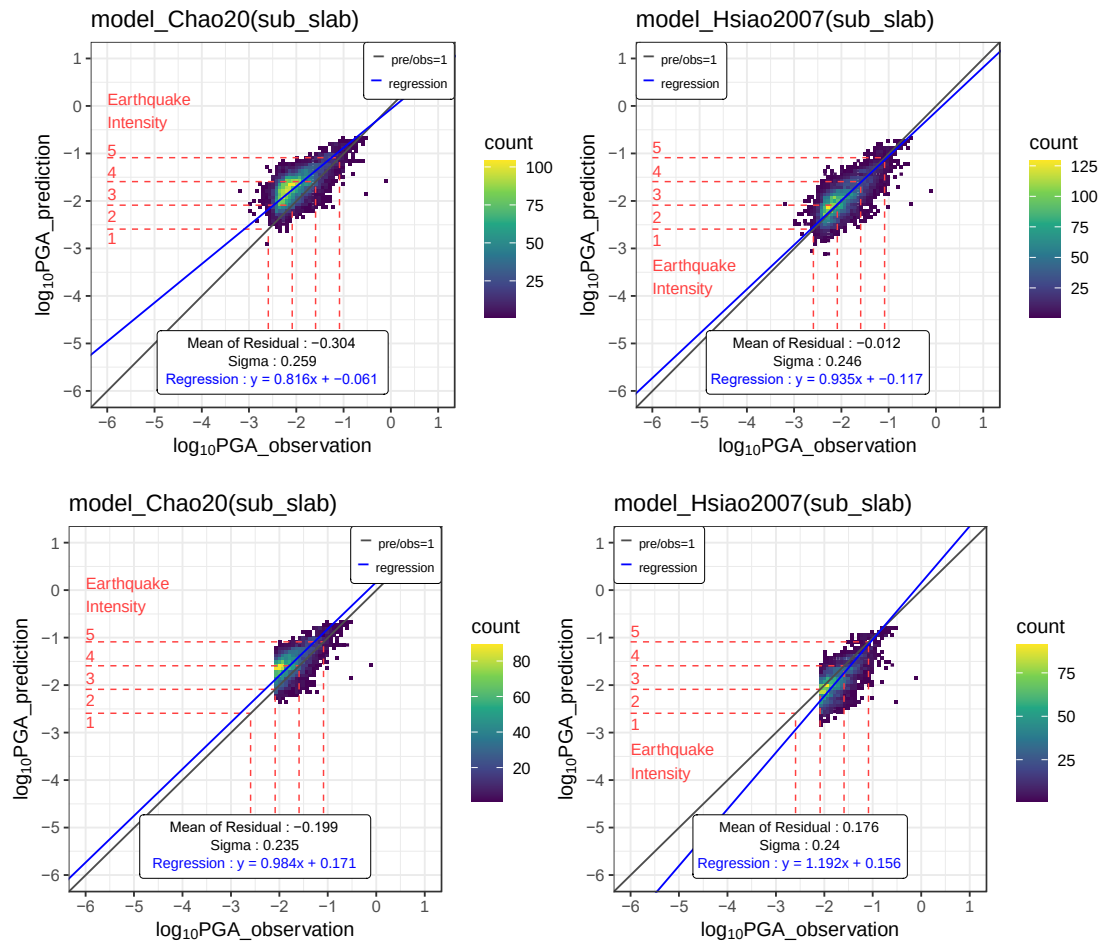


圖 7-4、新一代地動預估式與 Hsiao2007 之 PGA 比較圖

(隱沒帶內部型地震)

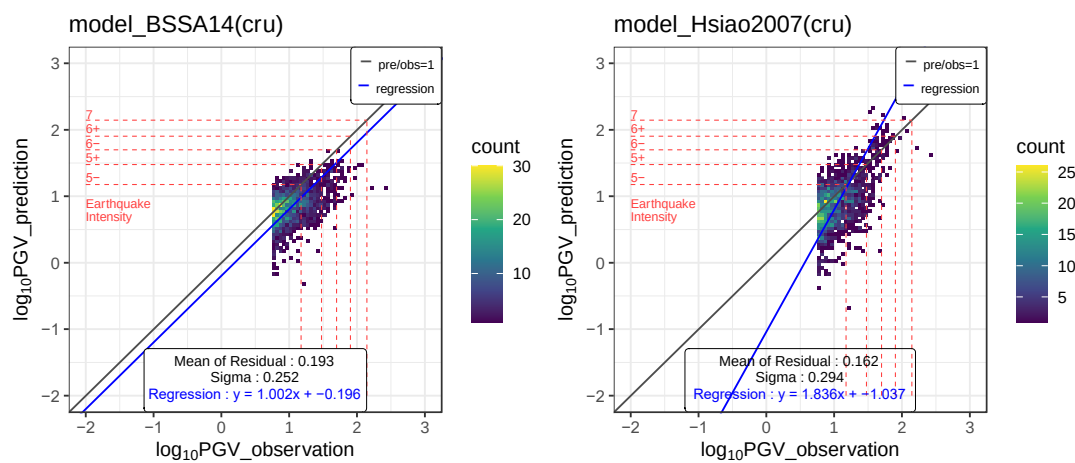


圖 7-5、新一代地動預估式與 Hsiao2007 之 PGV 比較圖

(淺部地殼地震)

八、結論與未來展望

綜合上節之比較，本計畫 PGA 成果淺部地殼地震、隱沒帶地震、隱沒帶內部型地震以及隱沒帶界面型地震在全震度下表現較好的地動預估模型分別是 I14.tw.C01、LL08.F04、Arroyo2010 與 Hsiao2007;震度三級以上則是 I14.tw.C01、PhungSub20、Zh06 與 Chao20。PGV 地動資料相對較少，目前淺部地殼地震類型以 BSSA14 為優，而隱沒帶內部型以 SI1999 為優，隱沒帶與隱沒帶界面型則因地動預估模型數量不足尚有改進空間，需再進一步搜尋。

地震危害度分析中廣泛應用的模型多為採用全球各地的資料統合建立的，由以上分析可知，新一代地動預估式已有納入臺灣地震與警系統之可能，並且在多方面上可優化現行預估式，精進地震預警作業。然而，適用於整個臺灣地區的地動預估式並不能完全解釋各地區的震動情況，對於特殊場址的區域，仍需進一步分析以提高震度預測的準確性。

九、參考文獻

1. Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, **32**(1), 23-44.
2. Akkar, S., & Çağnan, Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(6), 2978-2995.
3. Akkar, S., Sandikkaya, M. A., & Bommer, J. J. (2014). Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of earthquake engineering*, **12**(1), 359-387.
4. Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. A., & Singh, S. K. (2010). Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes. *Journal of Seismology*, **14**(4), 769-785.
5. Atkinson, G. M., & Boore, D. M. (2003). Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(4), 1703-1729.
6. Atkinson, G. M., & Macias, M. (2009). Predicted ground motions for great interface earthquakes in the Cascadia subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(3), 1552-1578.
7. Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., & Augliera, P. (2014). Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. *Bulletin of earthquake engineering*, **12**(1), 391-430.
8. Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, **30**(3), 1057-1085.

9. Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2003). Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(1), 314-331.
10. Chao, S.-H., Chiou, B., Hsu, C.-C., & Lin, P.-S. (2020). A horizontal ground-motion model for crustal and subduction earthquakes in Taiwan. *Earthquake Spectra*, **36**(2), 463-506.
11. García, D., Singh, S. K., Herráiz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. F. (2005). Inslab earthquakes of central Mexico: peak ground-motion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**(6), 2272-2282.
12. Gregor, N., Silva, W., Wong, I., & Youngs, R. (2006). Updated response spectral attenuation relationship for Cascadia subduction zone megathrust earthquake. *Seismological Research Letters*, **77**(2), 325-326.
13. Idriss, I. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, **30**(3), 1155-1177.
14. Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A., & Hamzehloo, H. (2015). A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(2A), 963-980.
15. Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., & Fukushima, Y. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(3), 879-897.
16. Lin, P.-S. (2009). Ground-motion attenuation relationship and path-effect study using Taiwan data set Ph. D. Dissertation].
17. Lin, P.-S., & Lee, C.-T. (2008). Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(1), 220-240.
18. Lin, P.-S., Lee, C.-T., Cheng, C.-T., & Sung, C.-H. (2011). Response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes in Taiwan. *Engineering Geology*, **121**(3-4), 150-164.
19. Loh, C.H. (1996). The parameters about the strong motion characteristics and the evaluation of seismic hazards, in *Guidelines of Aseismic Safety Evaluation and Retrofit for Telecommunication and Transportation Systems*, Nation Taiwan University Press, Taipei, Taiwan, 2-3.
20. Montalva, G. A., Bastías, N., & Rodriguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **107**(2), 901-911.
21. Phung, V.-B., Loh, C. H., Chao, S. H., Chiou, B. S., & Huang, B.-S. (2020). Ground motion prediction equation for crustal earthquakes in Taiwan. *Earthquake*

- Spectra*, **36**(4), 2129–2164.
22. Phung, V.-B., Loh, C. H., Chao, S. H., & Abrahamson, N. A. (2020). Ground motion prediction equation for Taiwan subduction zone earthquakes. *Earthquake Spectra*, **36**(3), 1331-1358.
 23. Shoushtari, A. V., Adnan, A. B., & Zare, M. (2018). Ground motion prediction equations for distant subduction interface earthquakes based on empirical data in the Malay Peninsula and Japan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **109**, 339-353.
 24. Si, H., & Midorikawa, S. (2000). New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault type and site condition. In *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering* (No. 0532).
 25. Stewart, J. P., Boore, D. M., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2016). "NGA-West2 equations for predicting vertical-component PGA, PGV, and 5%-damped PSA from shallow crustal earthquakes." *Earthquake Spectra* **32**(2), 1005-1031.
 26. Youngs, R., Chiou, S.-J., Silva, W., & Humphrey, J. (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, **68**(1), 58-73.
 27. Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., & Somerville, P. G. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(3), 898-913.
 28. Zhao, J. X., Zhou, S., Zhou, J., Zhao, C., Zhang, H., Zhang, Y., Gao, P., Lan, X., Rhoades, D., & Fukushima, Y. (2016). Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106**(4), 1552-1569.
 29. 內政部，2004，震災災害防救業務計畫，共 50 頁。
 30. 國家地震工程研究中心，2011，面震源與衰減律參數研究及核電廠地盤反應量測，行政院原子能委員會核能研究所委託研究報告。
 31. 財團法人中興工程顧問社，2012，臺灣地區新一代強地動衰減式研究，財團法人中興工程顧問社工程技術專案研發報告摘要集。
 32. 蕭乃祺，2007，臺灣即時強地動觀測於地震預警之應用，國立中央大學博士論文，共 194 頁。
 33. 楊佩欣，2019，臺灣東北部隱沒帶地震地動預估式之精進研究，國立中央大學碩士論文，共 229 頁。

附錄 1

(本計畫經參數殘差篩選後之可用地動預估模型，共計 42 個)

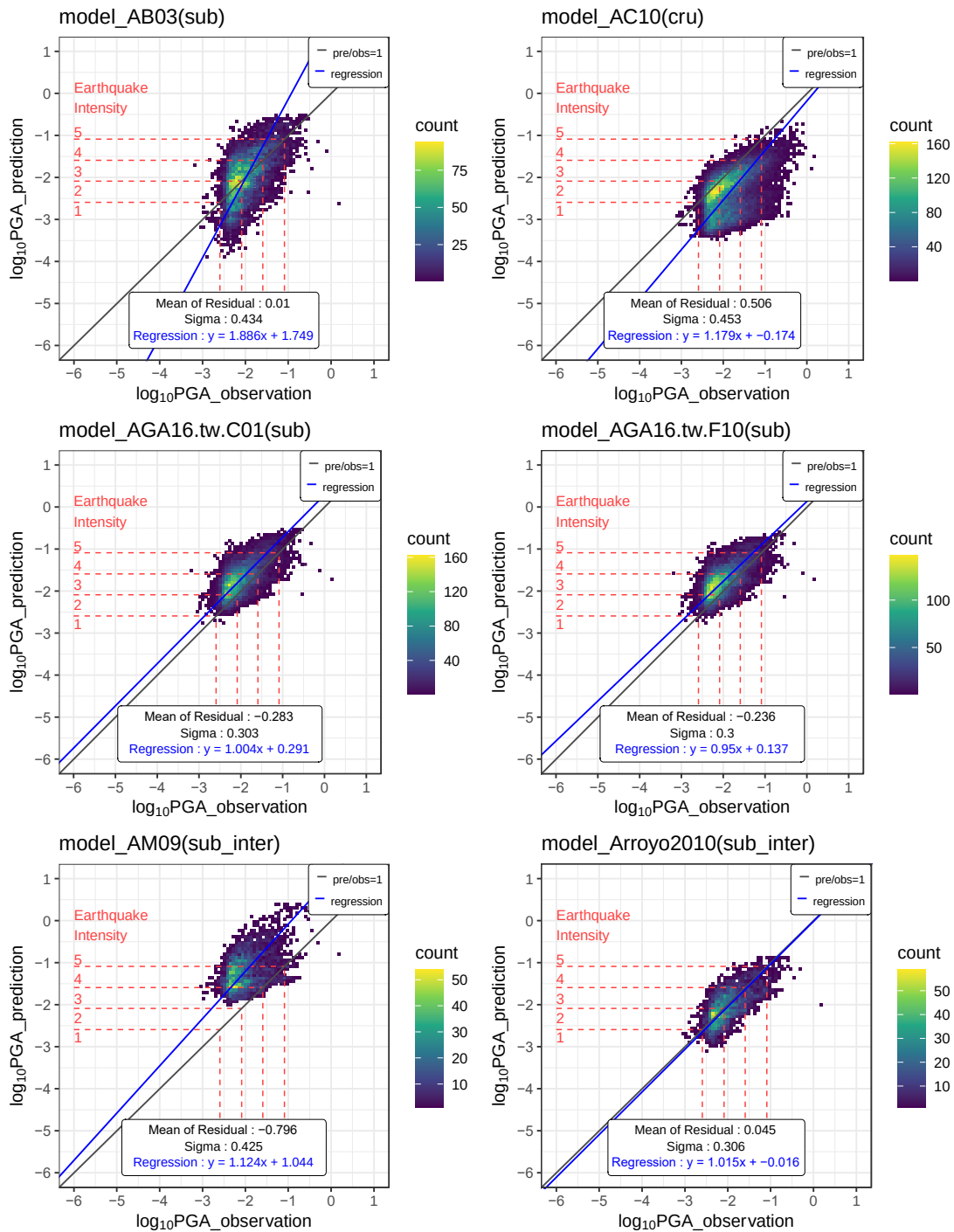
Model	EQ_type	Parameter_type	Meanofresidual	Sigma	Regression_b	Regression_b_I>3
AGA16.tw.C01	sub	PGA	-0.283	0.303	1.004	1.293
AGA16.tw.F10	sub	PGA	-0.236	0.300	0.950	1.229
Arroyo2010	sub_inter	PGA	0.045	0.306	1.015	1.131
ASB14	cru	PGA	0.007	0.272	0.829	0.866
ASB14.tw.B01	cru	PGA	-0.061	0.273	0.831	0.868
ASB14.tw.C01	cru	PGA	-0.056	0.275	0.849	0.888
ASB14.tw.E02	cru	PGA	-0.093	0.283	0.896	0.943
BCHydroSub2018Global	sub	PGA	-0.247	0.305	1.021	1.171
BCHydroSub2018SouthAM	sub	PGA	-0.265	0.299	0.968	1.103
BCHydroSub2018TW	sub	PGA	-0.209	0.305	0.772	0.915
BI14	cru	PGA	-0.033	0.269	0.822	0.852
BI14.tw.B01	cru	PGA	-0.034	0.269	0.710	0.742
BI14.tw.C01	cru	PGA	-0.041	0.267	0.756	0.788
BI14.tw.E02	cru	PGA	-0.057	0.268	0.753	0.785
BSSA14	cru	PGA	-0.160	0.304	0.853	0.842

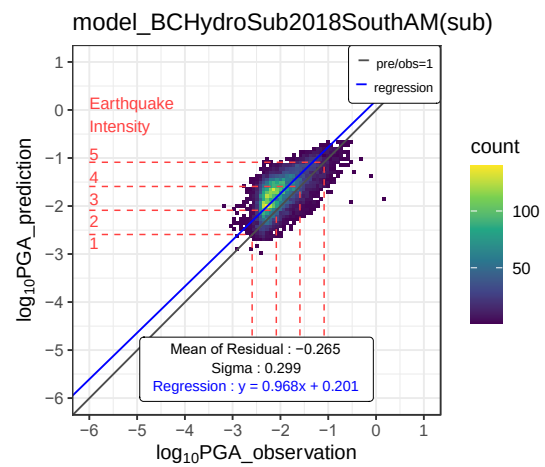
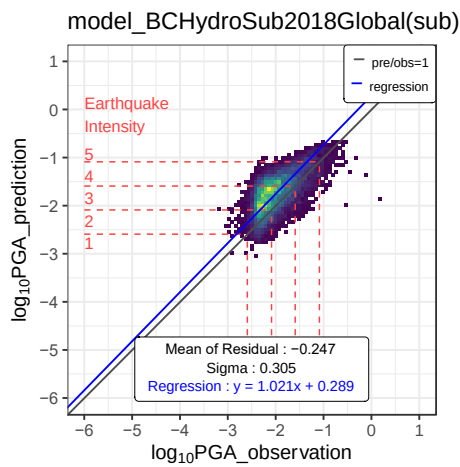
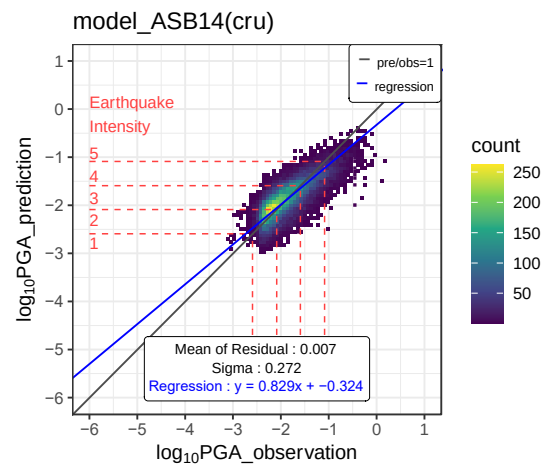
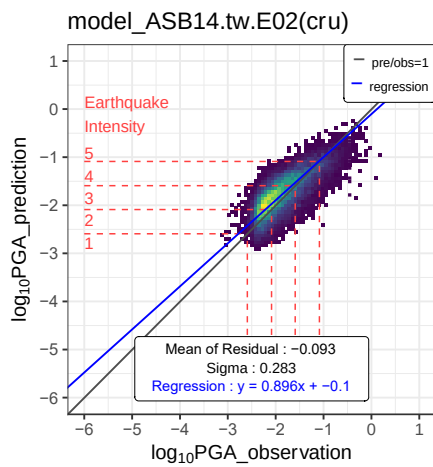
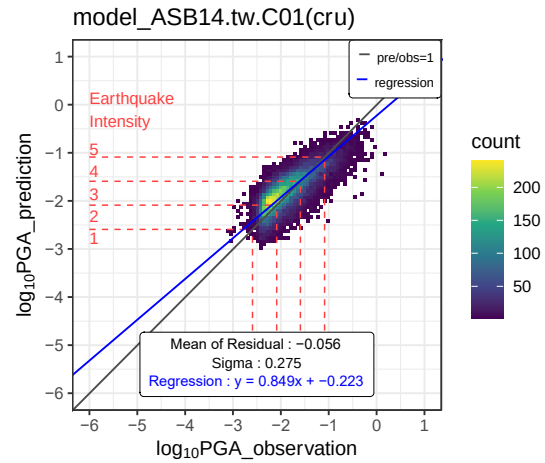
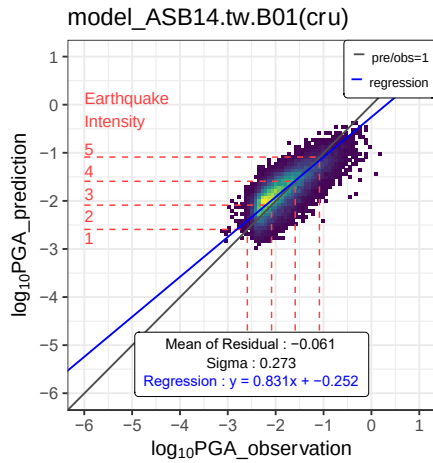
Model	EQ_type	Parameter_type	Meanofresidual	Sigma	Regression_b	Regression_b_I>3
BSSA14.tw.B01	cru	PGA	-0.007	0.283	0.783	0.763
BSSA14.tw.C01	cru	PGA	0.002	0.290	0.826	0.798
BSSA14.tw.E02	cru	PGA	-0.006	0.292	0.827	0.794
Chao20(sub)	sub	PGA	-0.245	0.282	0.913	1.083
Chao20(sub_inter)	sub_inter	PGA	-0.129	0.293	0.990	1.172
Garcia05	sub_slab	PGA	-0.292	0.331	1.122	1.439
I14	cru	PGA	-0.165	0.299	0.924	0.974
I14.tw.B01	cru	PGA	-0.079	0.271	0.915	0.953
I14.tw.C01	cru	PGA	-0.088	0.277	0.968	1.007
I14.tw.E04	cru	PGA	-0.142	0.274	0.921	0.959
KAAH15	cru	PGA	0.099	0.281	0.817	0.566
Kanno06(cru)	cru	PGA	-0.211	0.294	0.935	0.971
Kanno06(sub)	sub	PGA	-0.291	0.295	1.070	1.293
Kanno06(sub_inter)	sub_inter	PGA	-0.251	0.279	0.978	1.134
Lin09	cru	PGA	-0.143	0.271	0.686	0.712
Lin11	cru	PGA	0.079	0.277	0.811	0.872
LL08	sub	PGA	-0.251	0.272	0.725	0.808
LL08.C02	sub	PGA	-0.018	0.309	0.917	1.120
LL08.F04	sub	PGA	-0.178	0.317	0.991	1.320
Loh96	cru	PGA	0.019	0.276	0.842	0.912
NCREE2011	cru	PGA	0.039	0.309	1.112	1.211

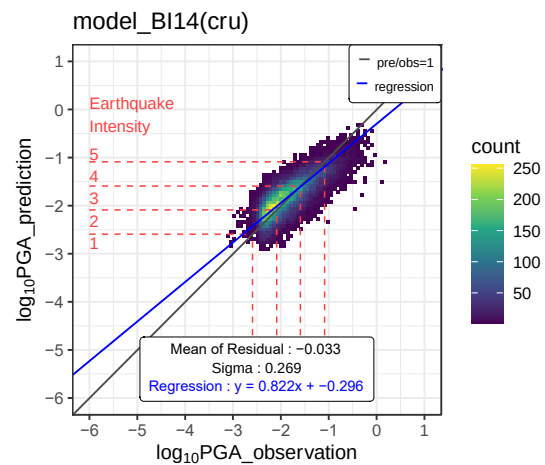
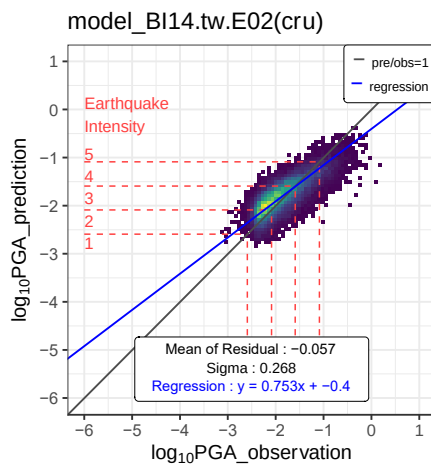
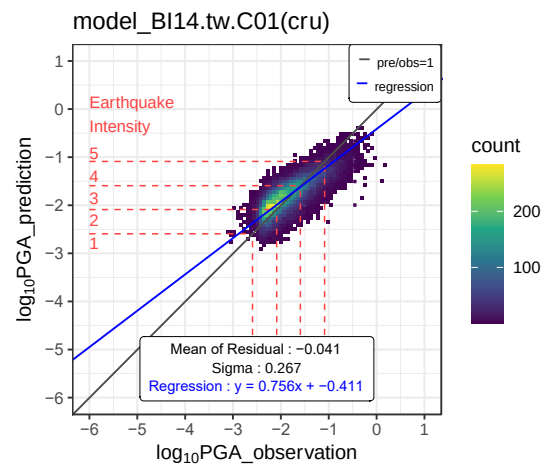
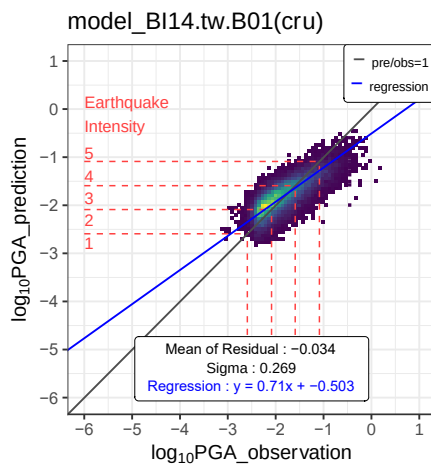
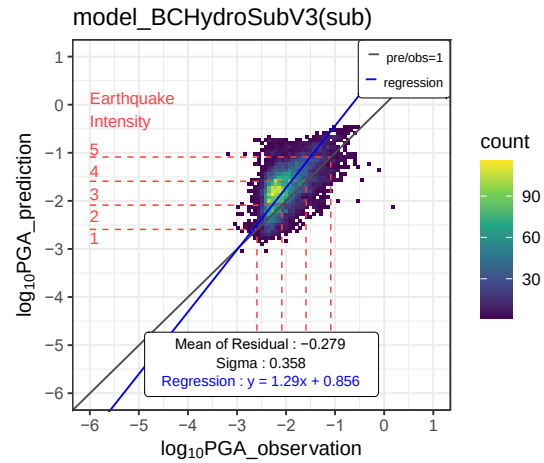
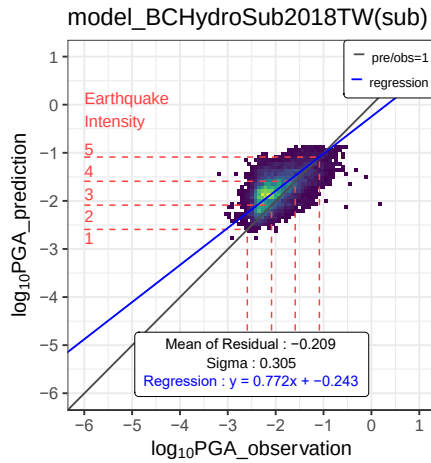
PhungCru20	cru	PGA	-0.139	0.272	0.908	0.888
PhungSub20	sub	PGA	-0.148	0.299	0.887	1.045
Sinotech12	cru	PGA	-0.146	0.272	0.764	0.798
Model	EQ_type	Parameter_type	Meanofresidual	Sigma	Regression_b	Regression_b_I>3
Zh06(cru)	cru	PGA	-0.228	0.277	0.837	0.874
Zh06(sub_inter)	sub_inter	PGA	-0.189	0.275	0.842	0.915
Zh16Inter	sub_inter	PGA	-0.244	0.338	1.122	1.413

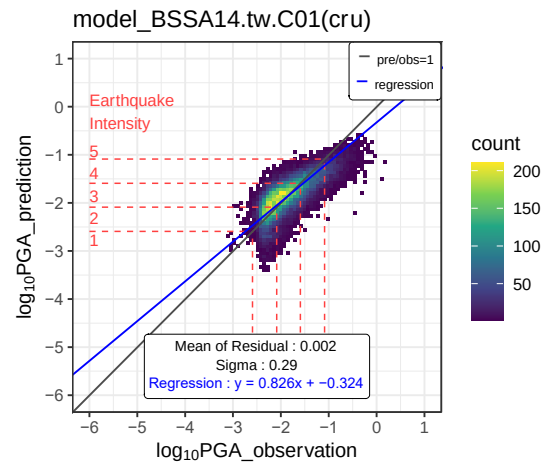
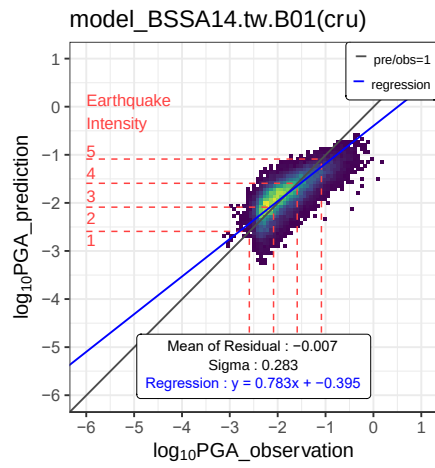
附錄 2

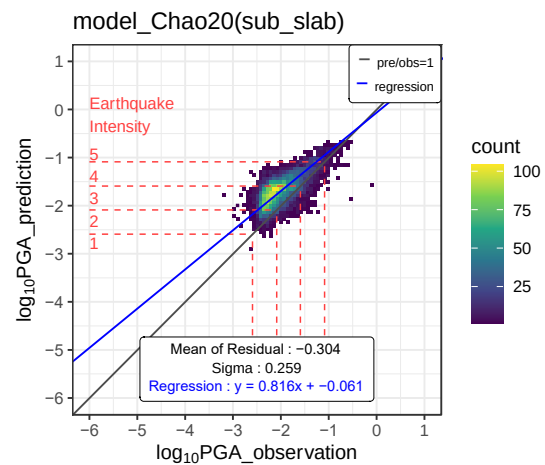
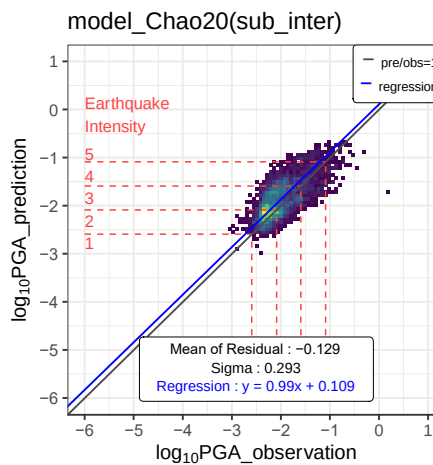
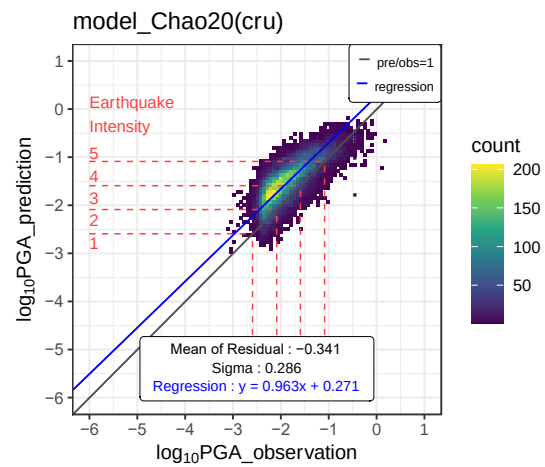
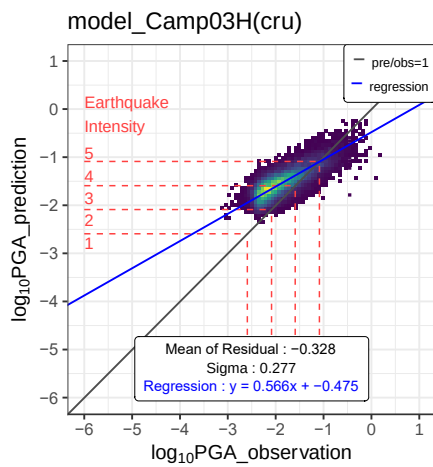
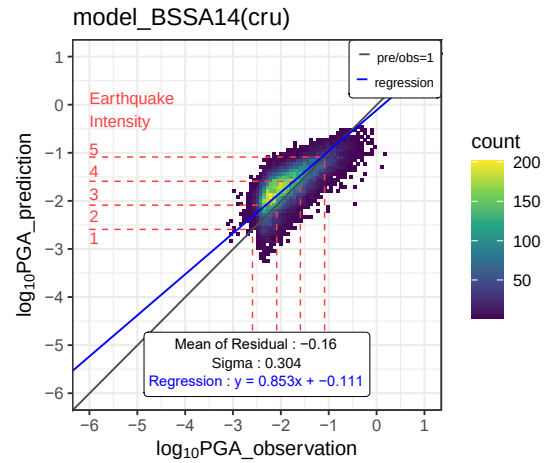
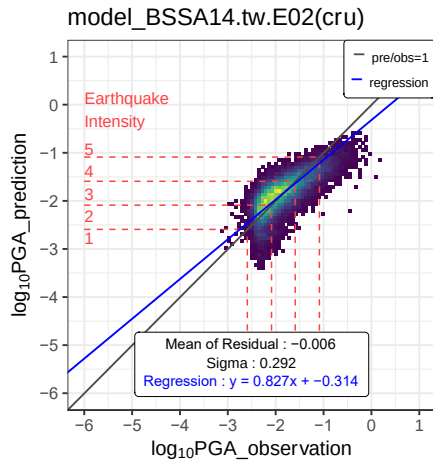
(本計畫所收錄之地動預估模型觀測與預測資料全震度殘差分佈圖總覽)

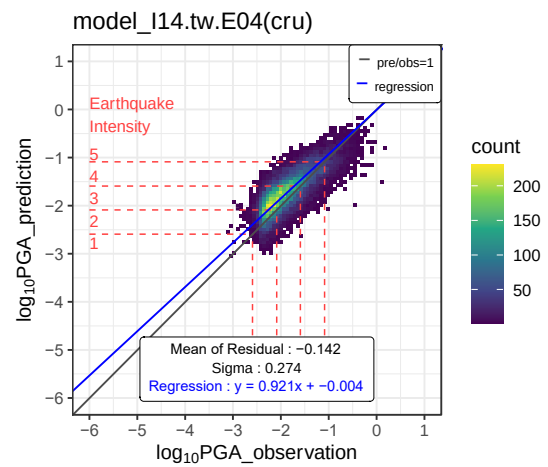
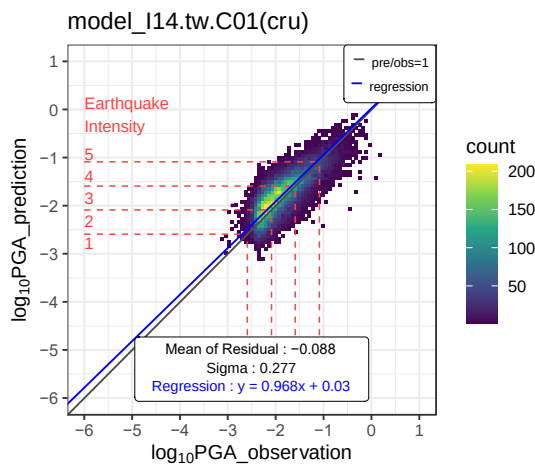
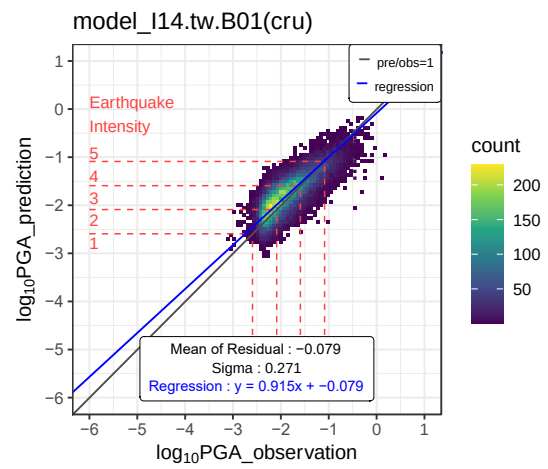
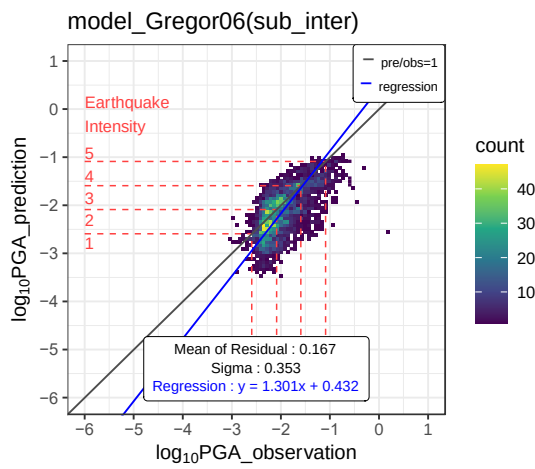
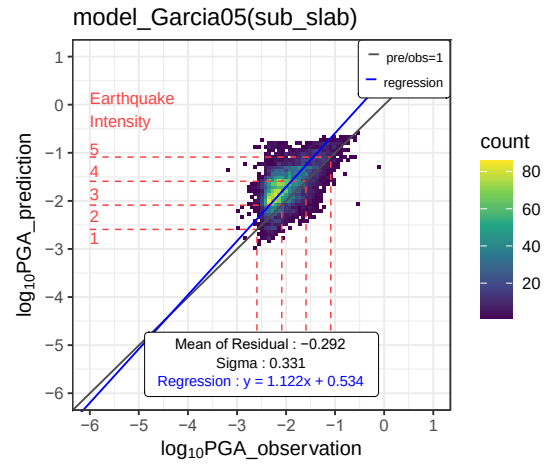
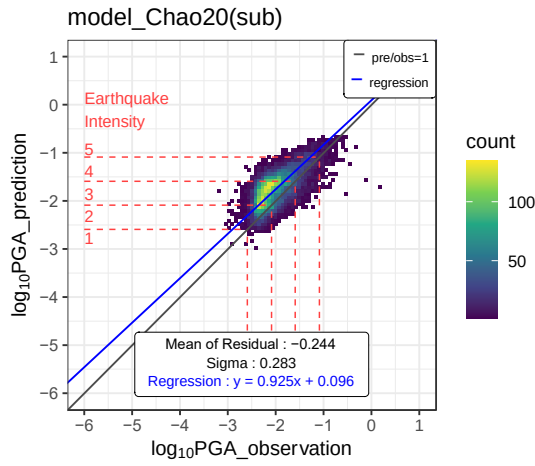


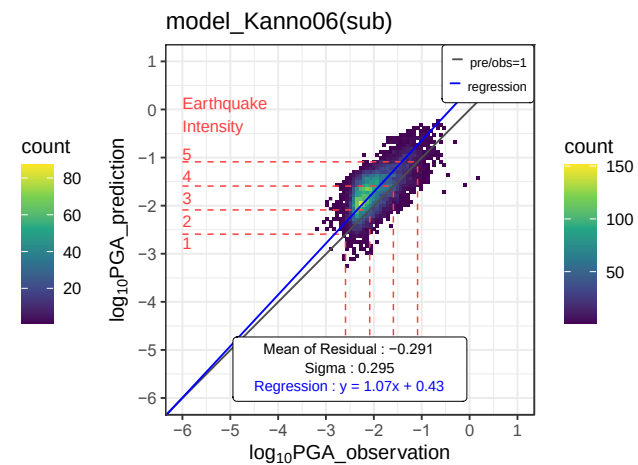
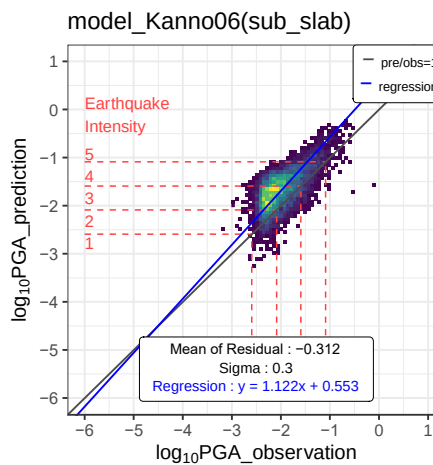
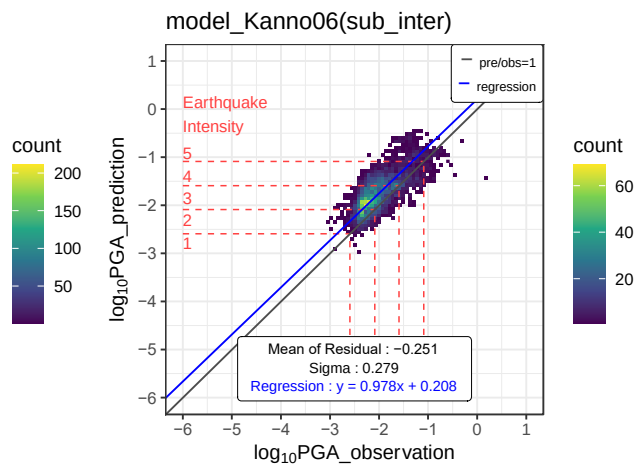
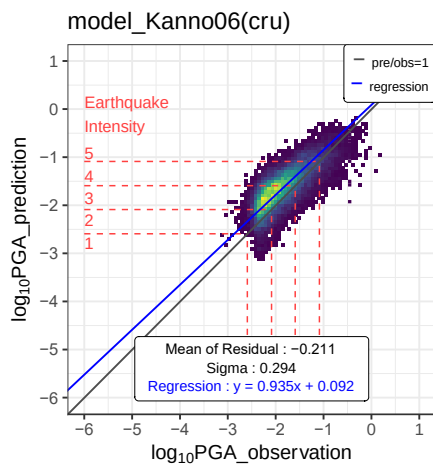
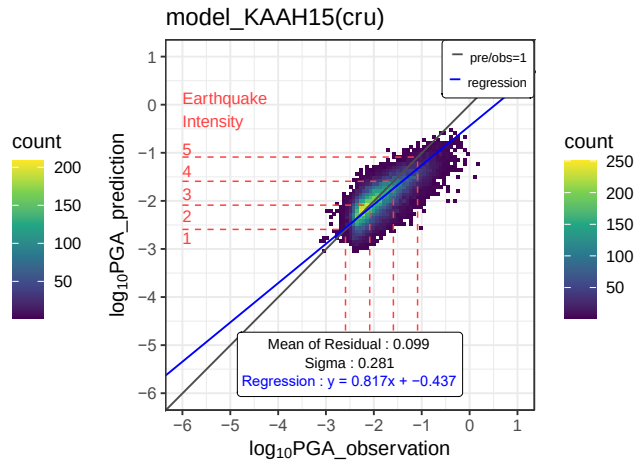
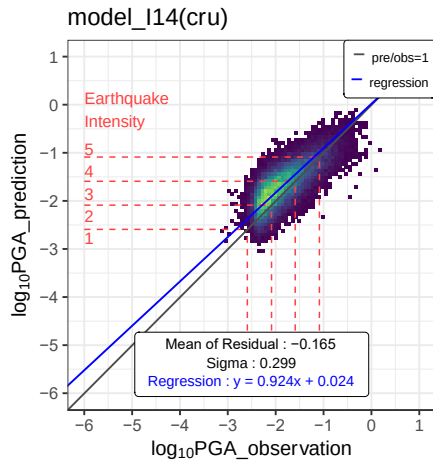


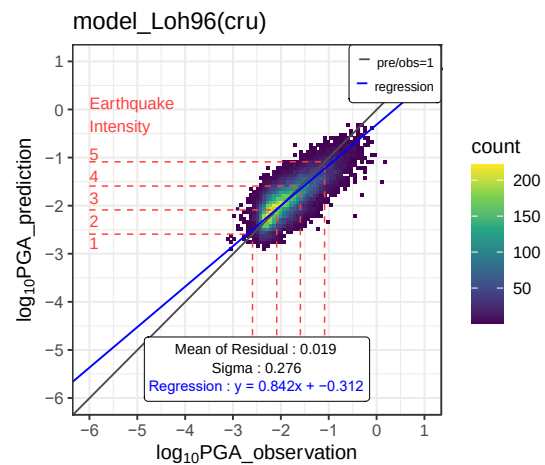
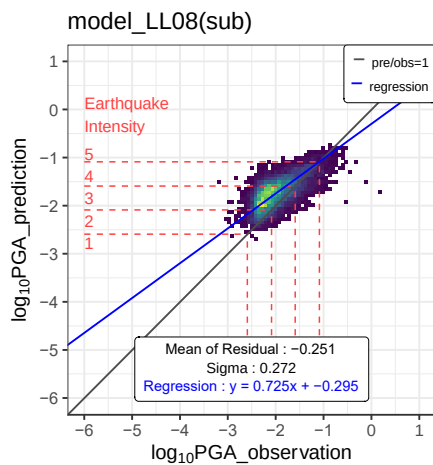
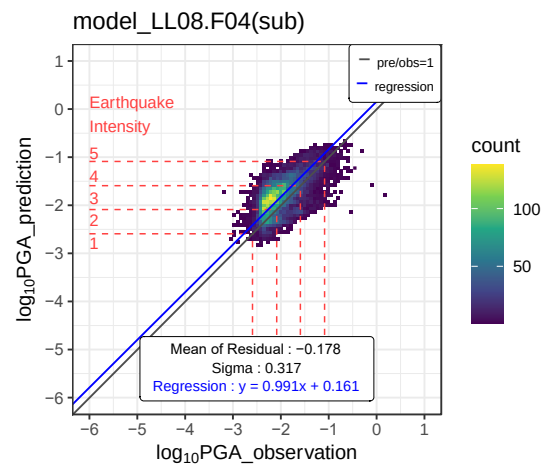
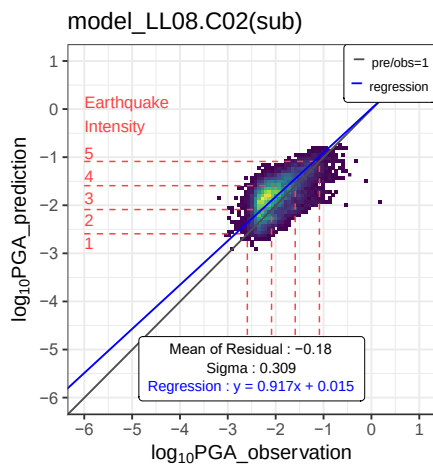
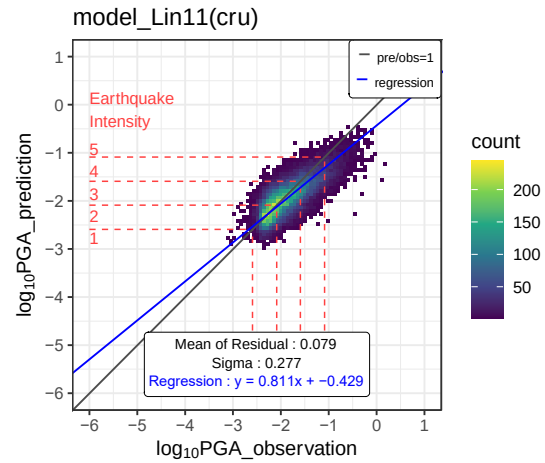
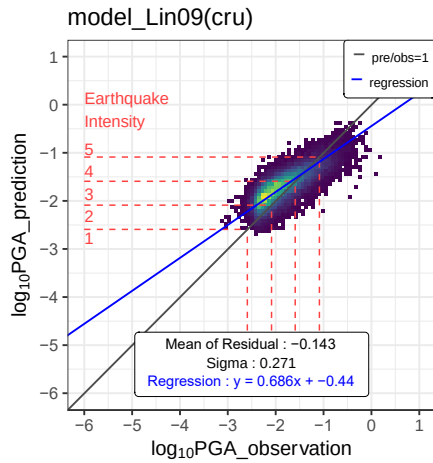


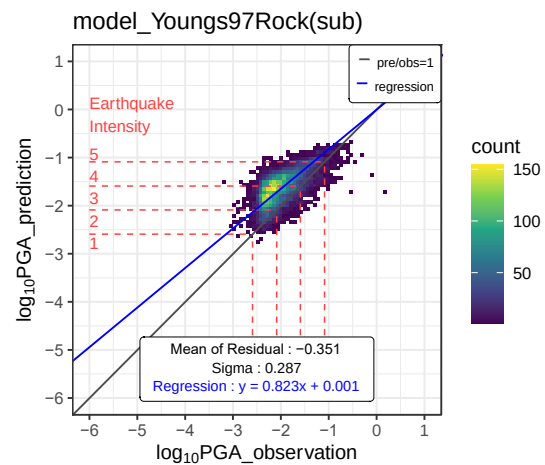
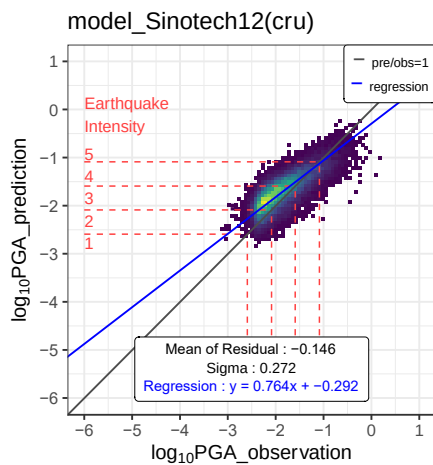
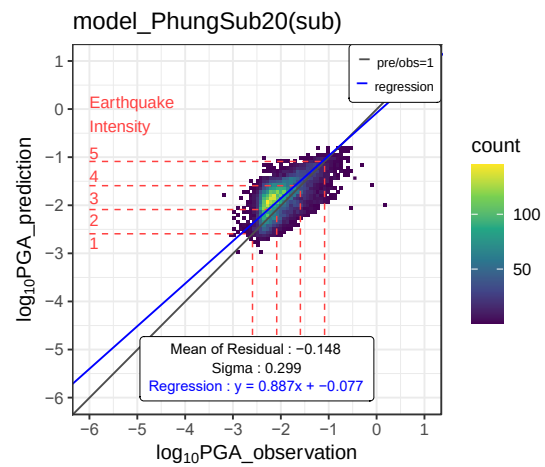
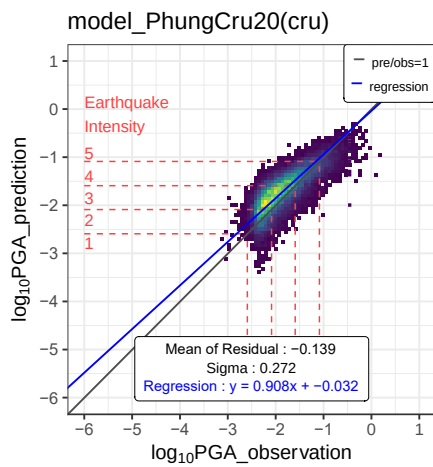
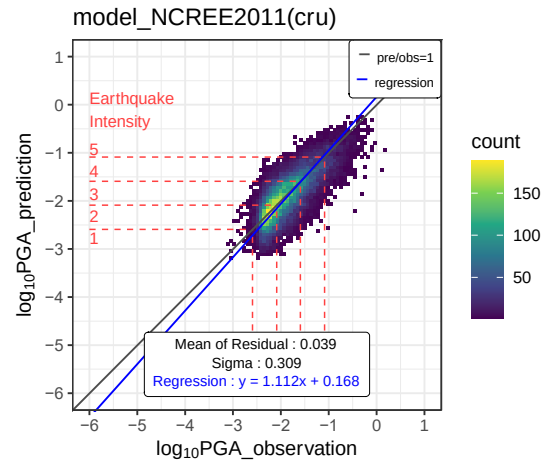
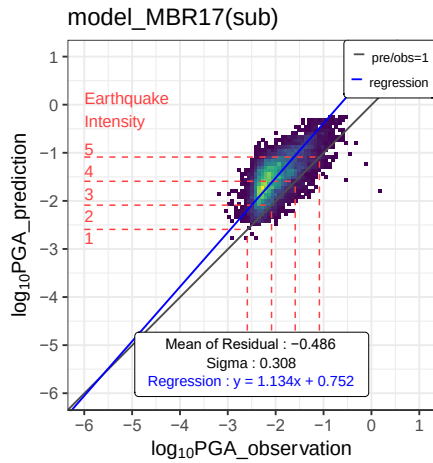


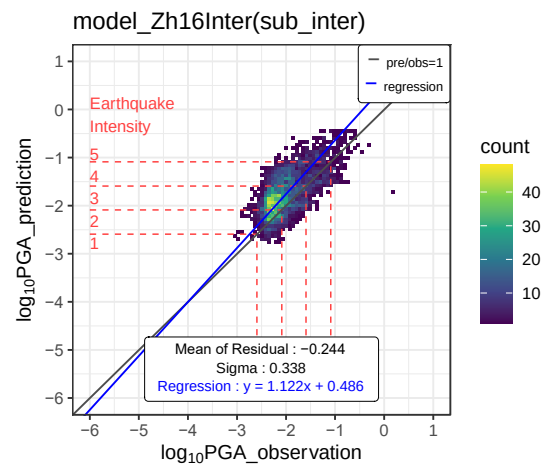
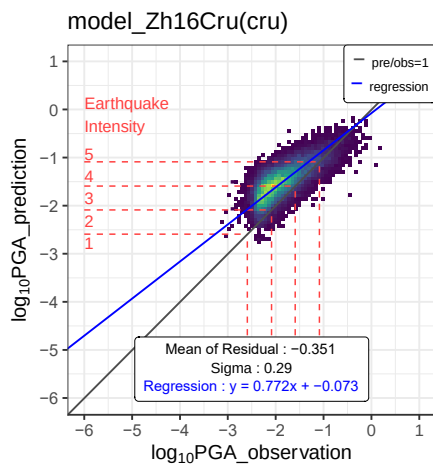
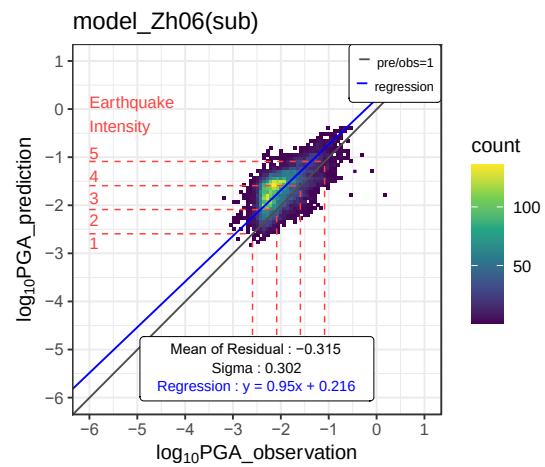
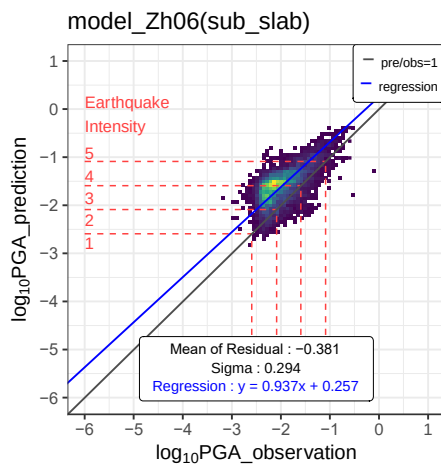
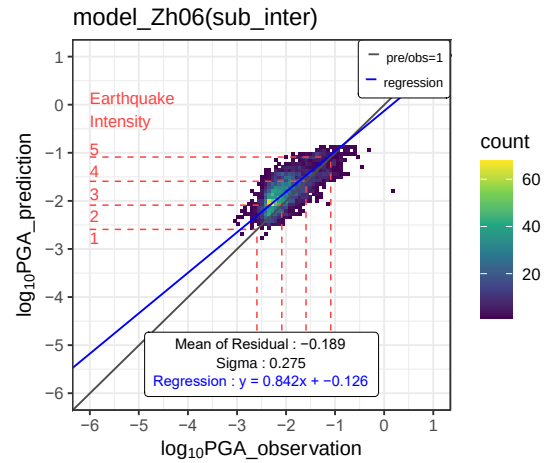
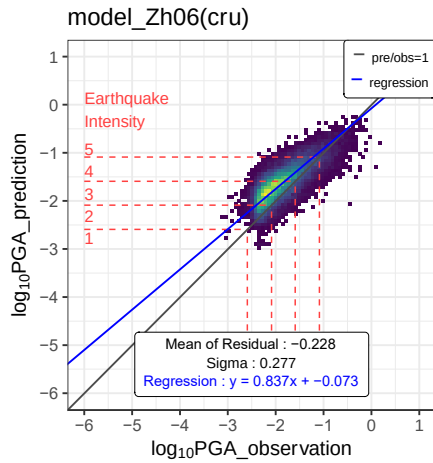


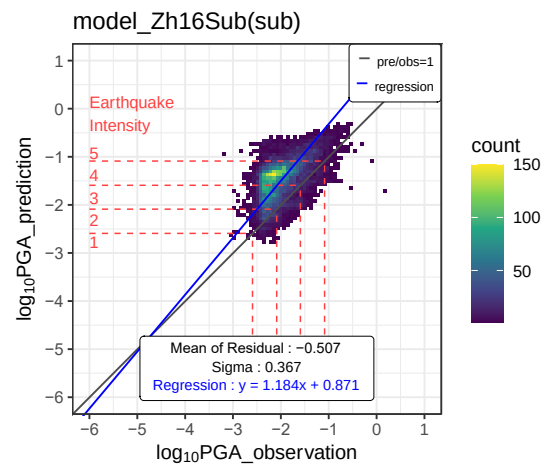
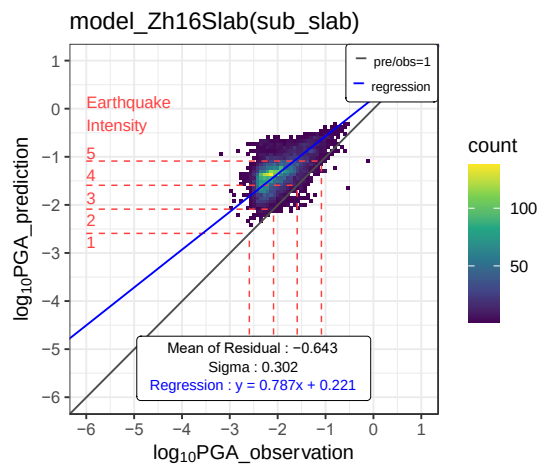






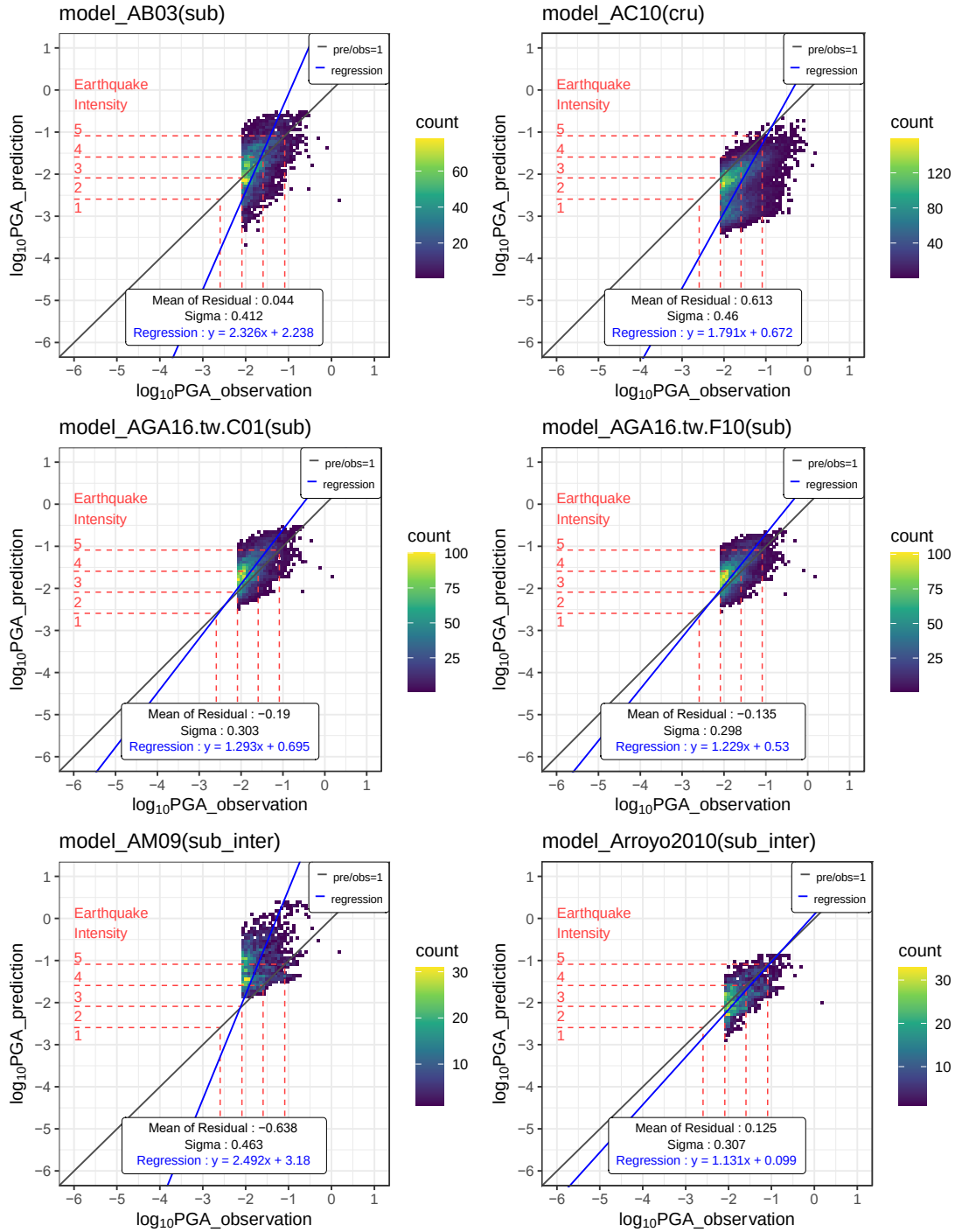


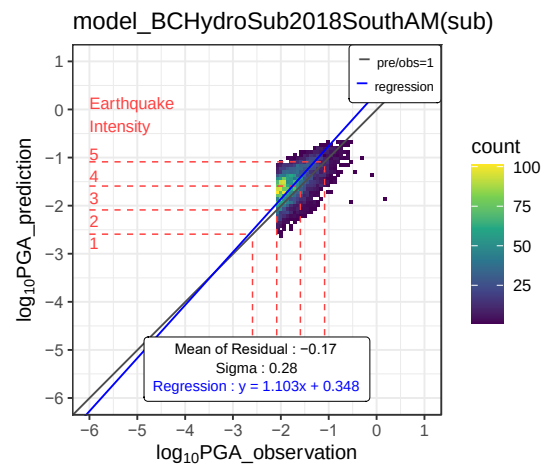
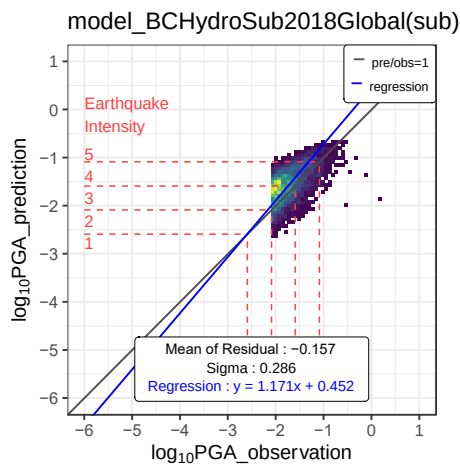
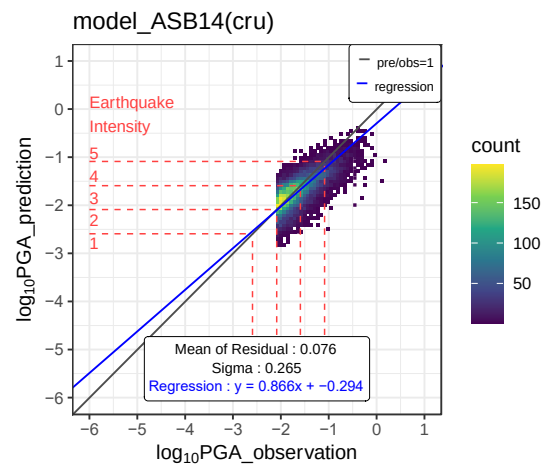
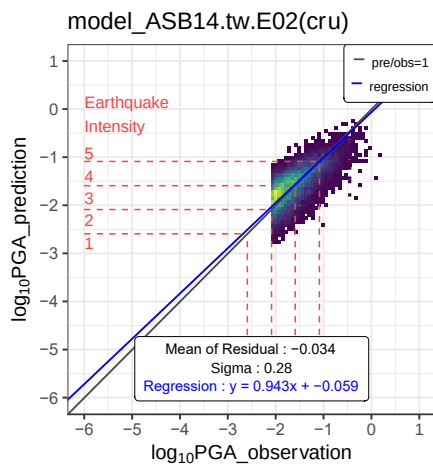
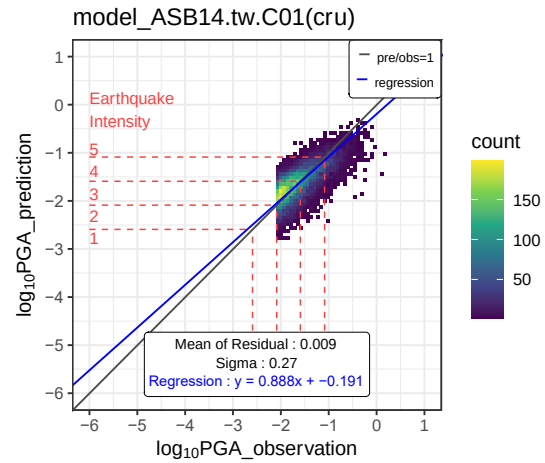
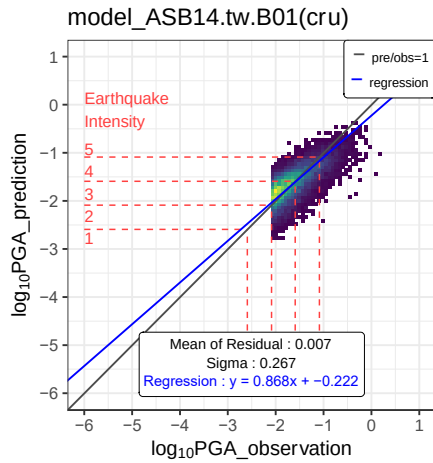


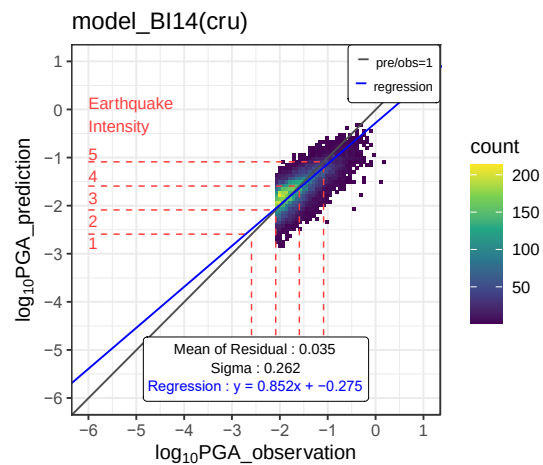
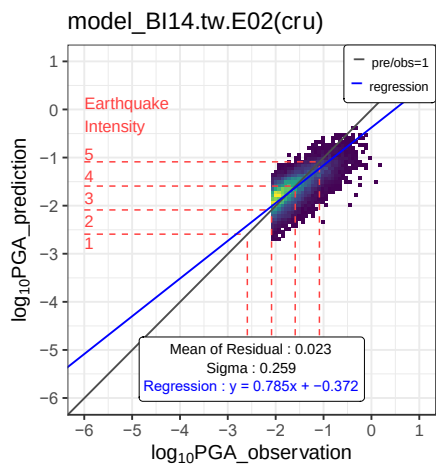
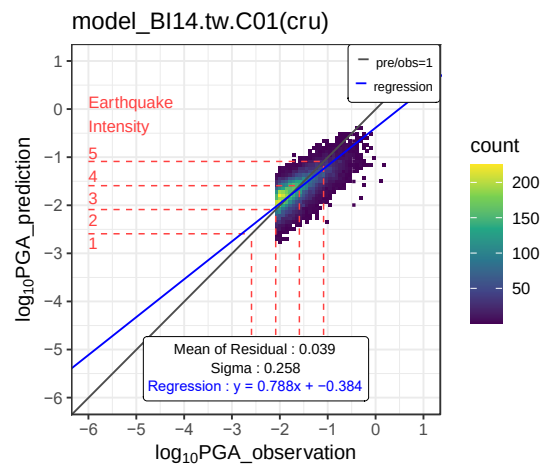
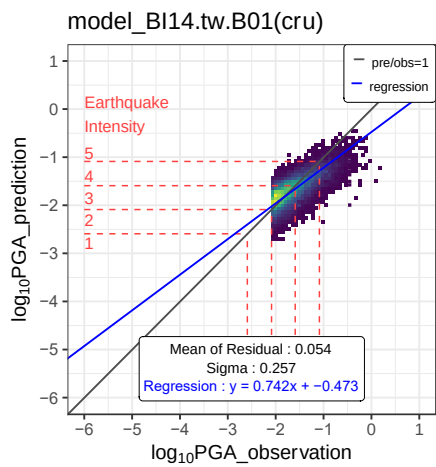
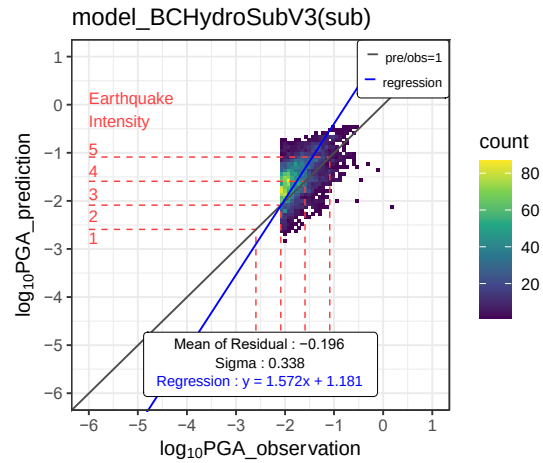
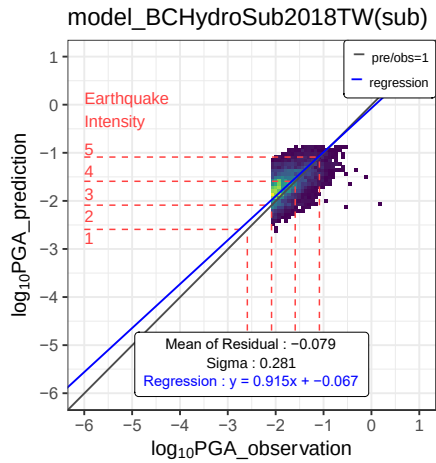


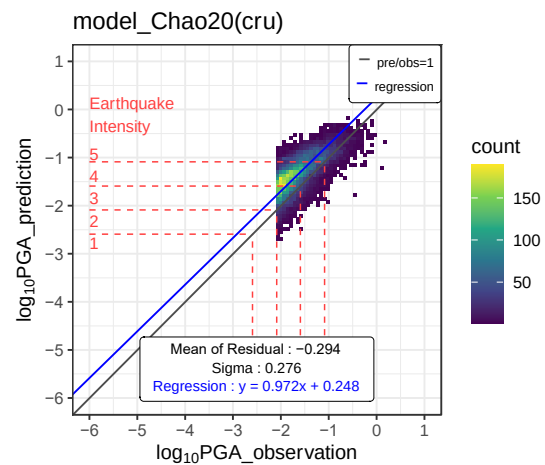
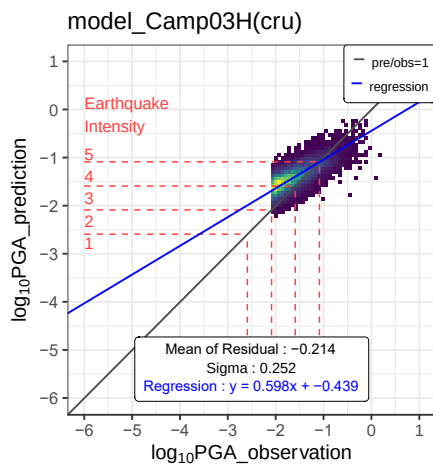
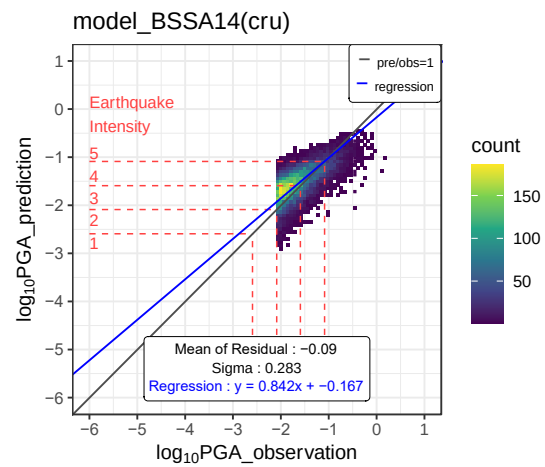
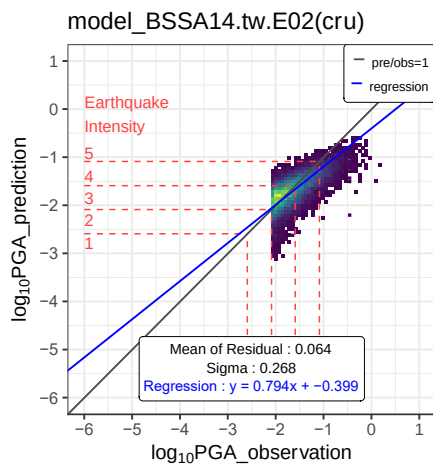
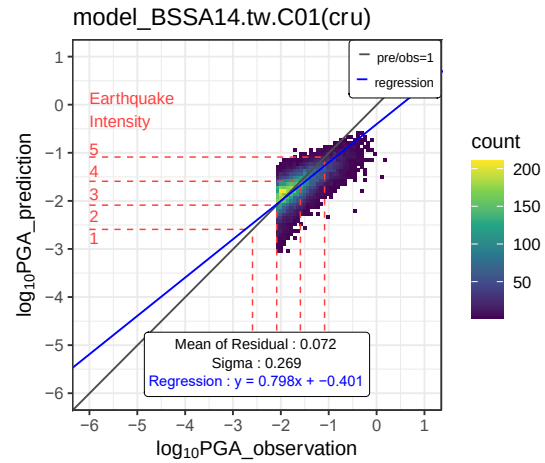
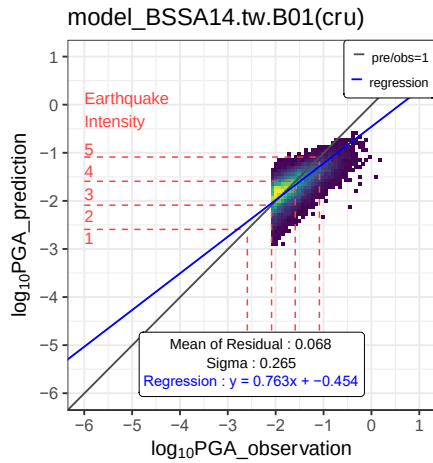
附錄 3

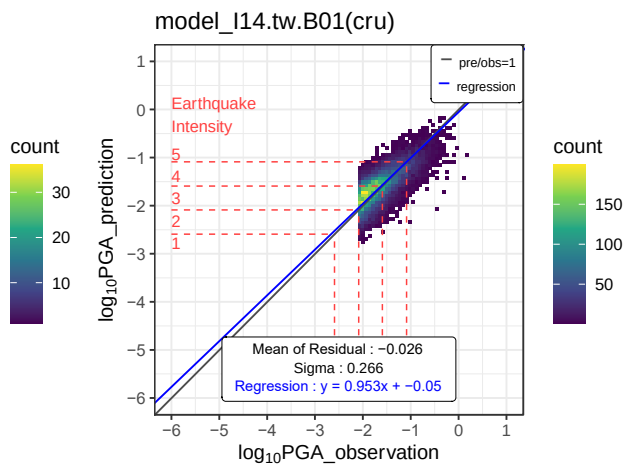
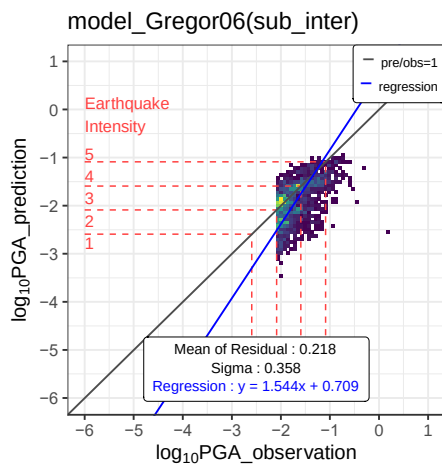
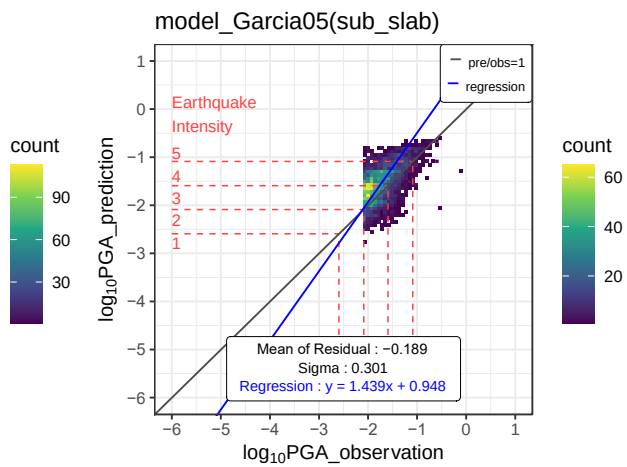
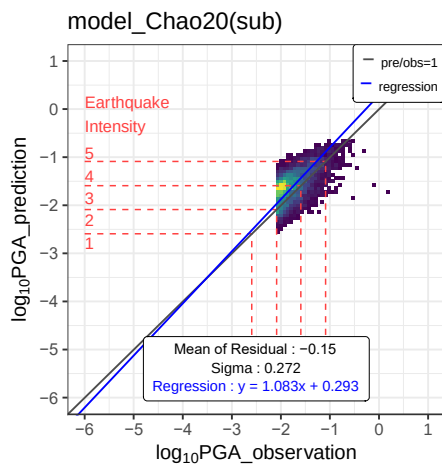
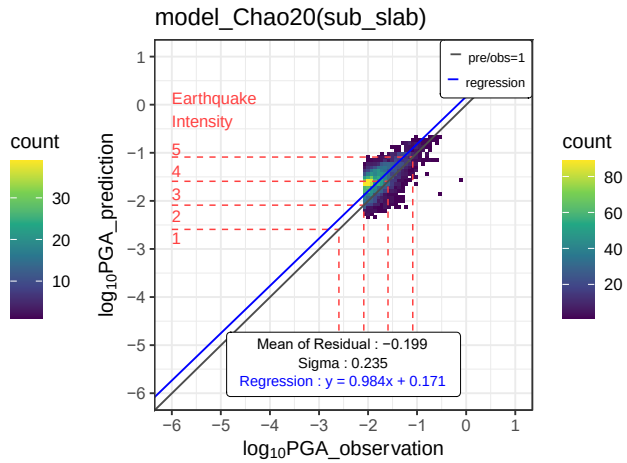
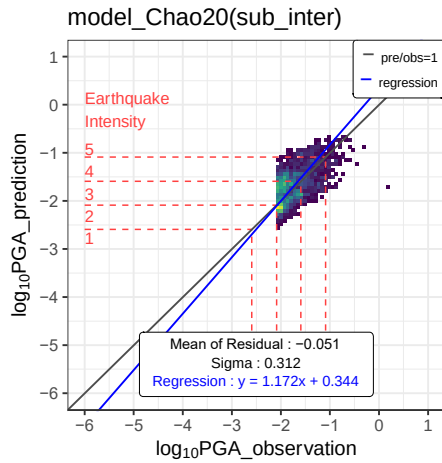
(本計畫所收錄之地動預估模型觀測與預測資料震度三級以上殘差分佈圖總覽)

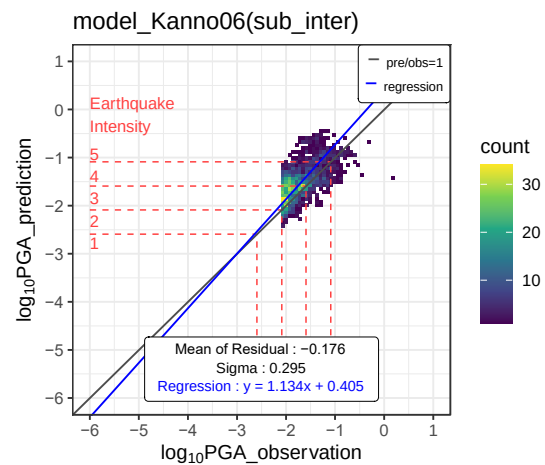
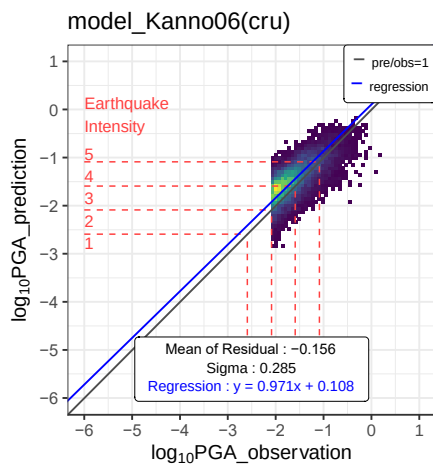
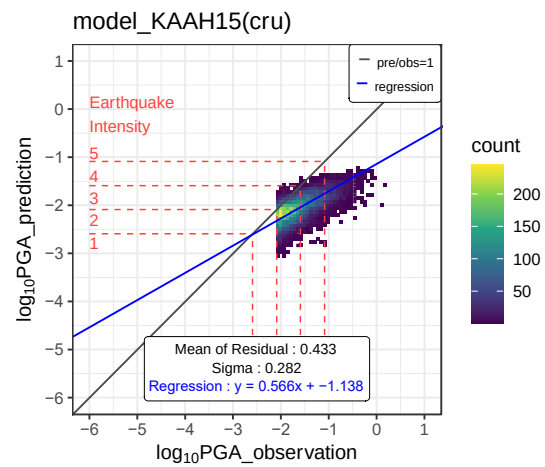
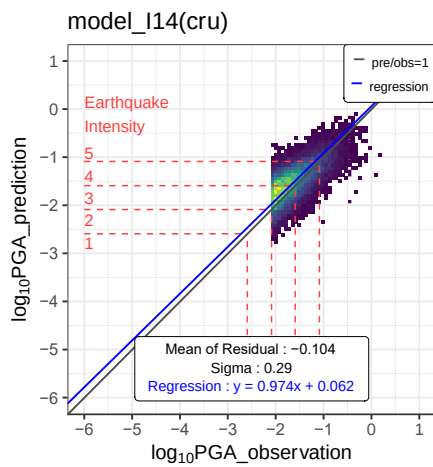
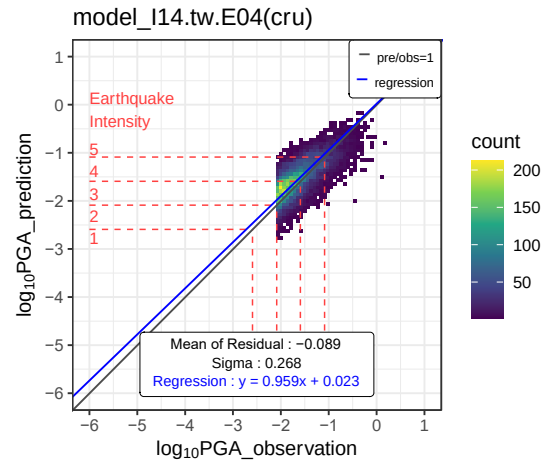
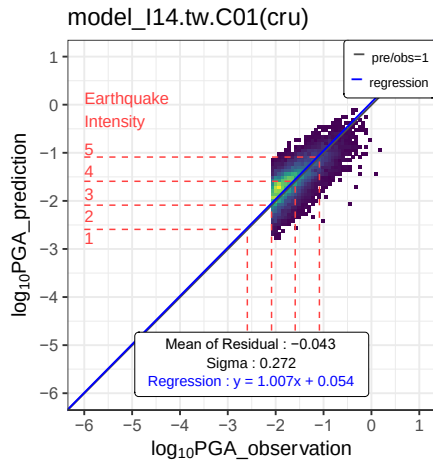


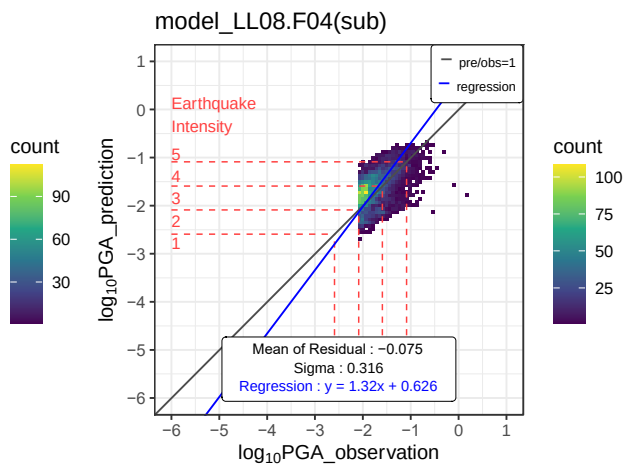
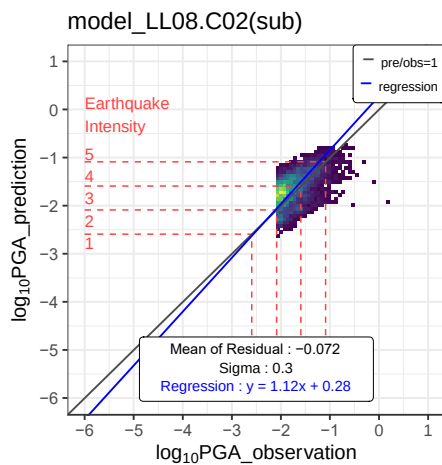
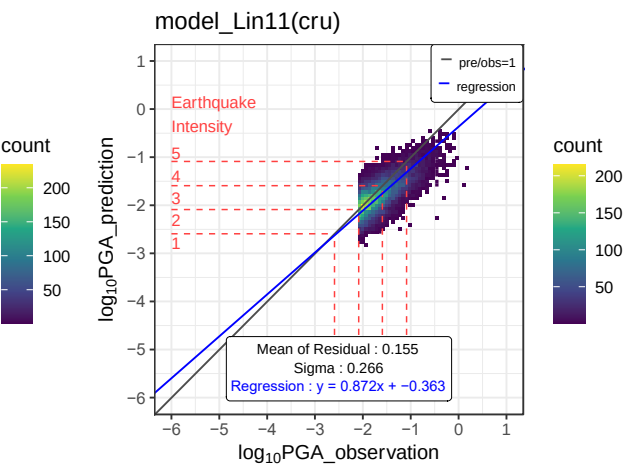
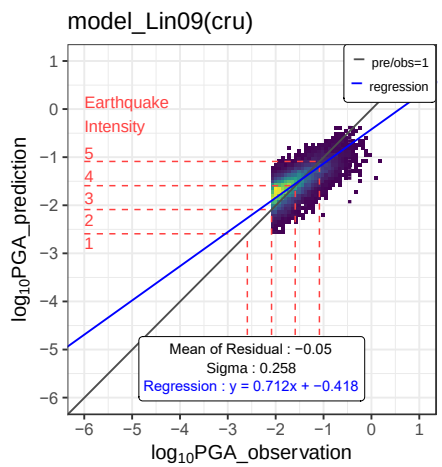
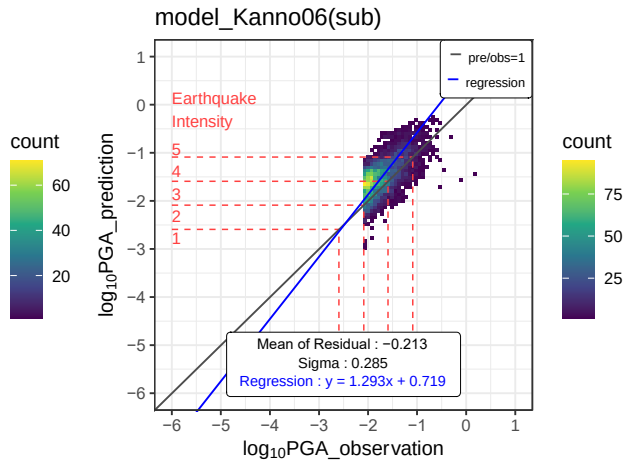
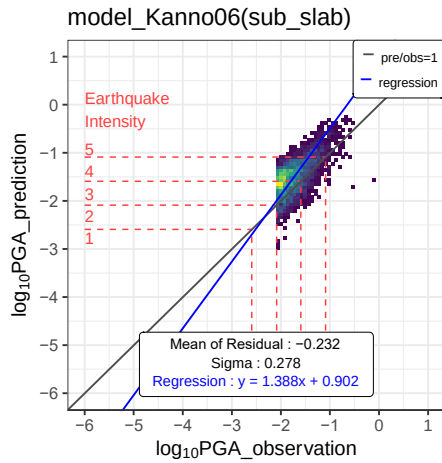


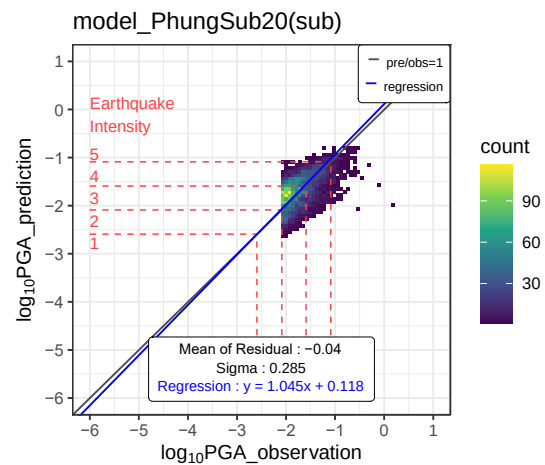
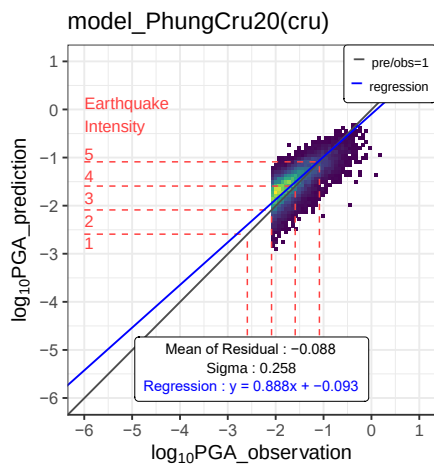
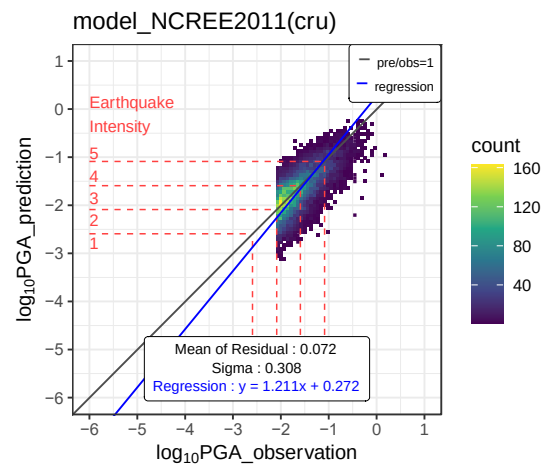
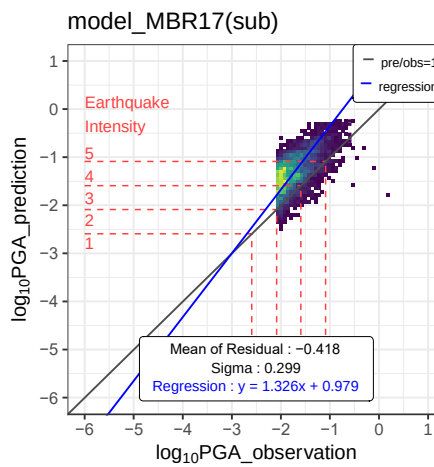
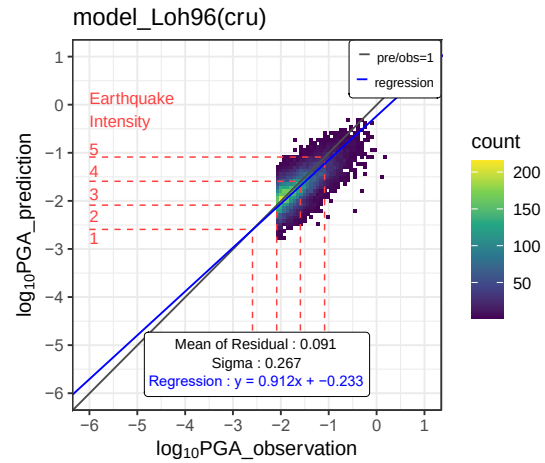
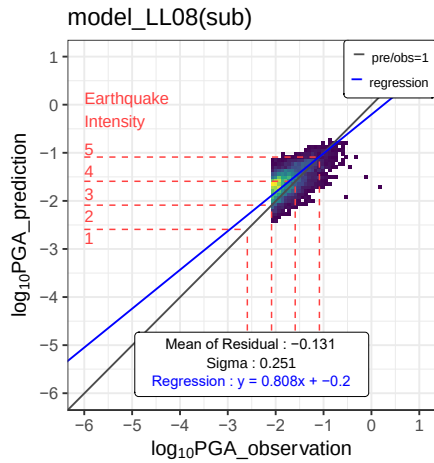


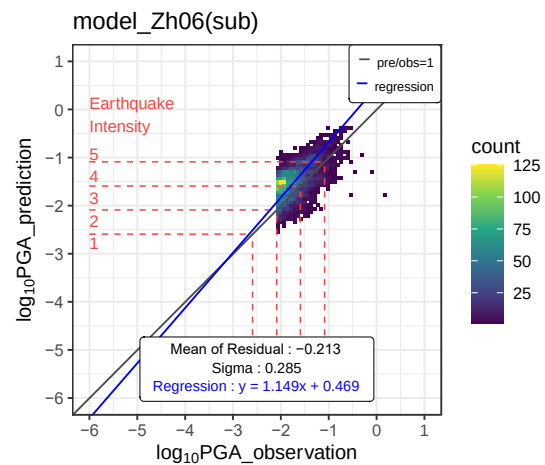
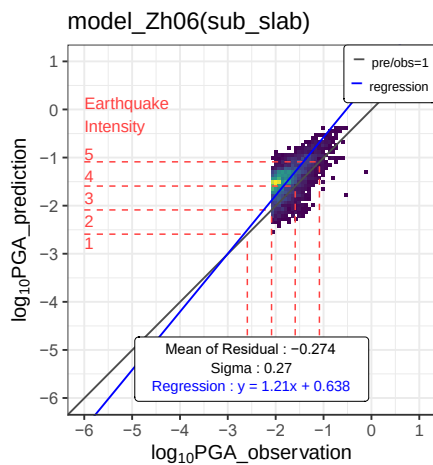
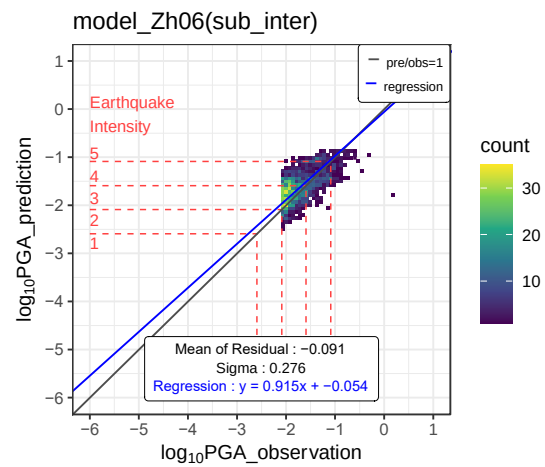
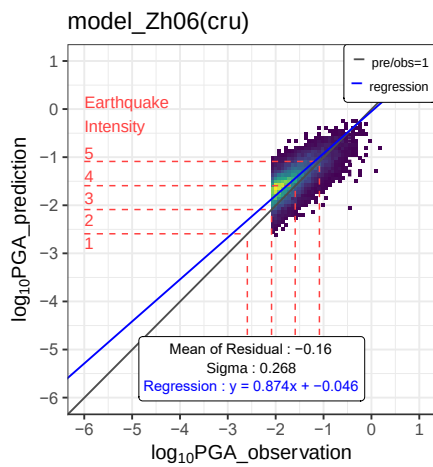
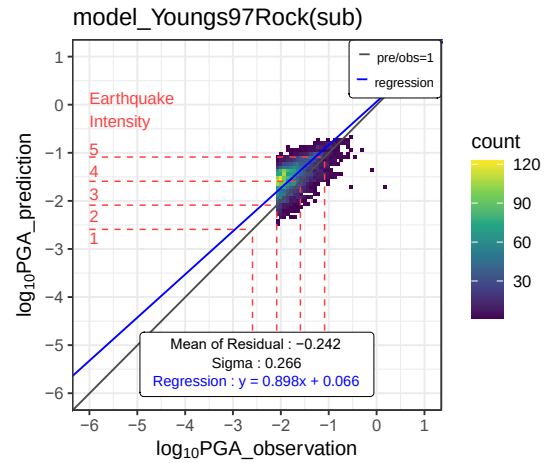
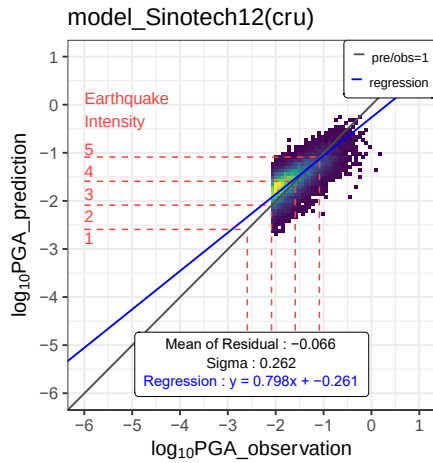


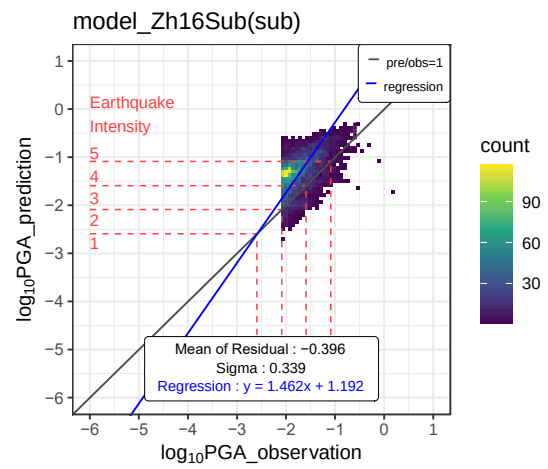
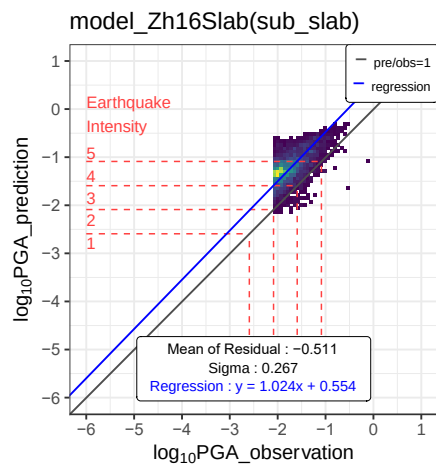
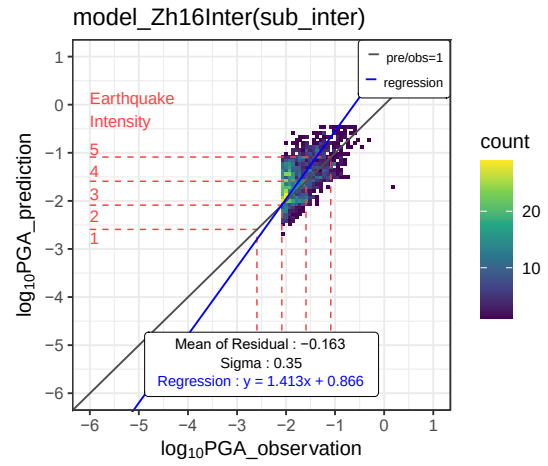
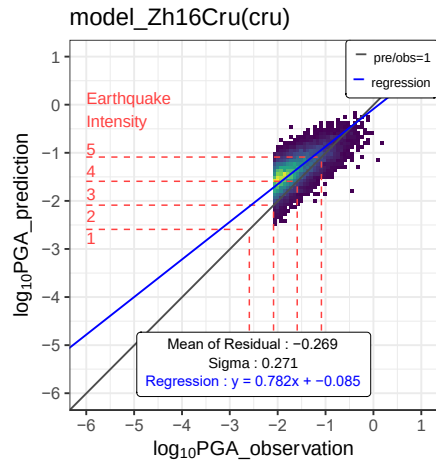






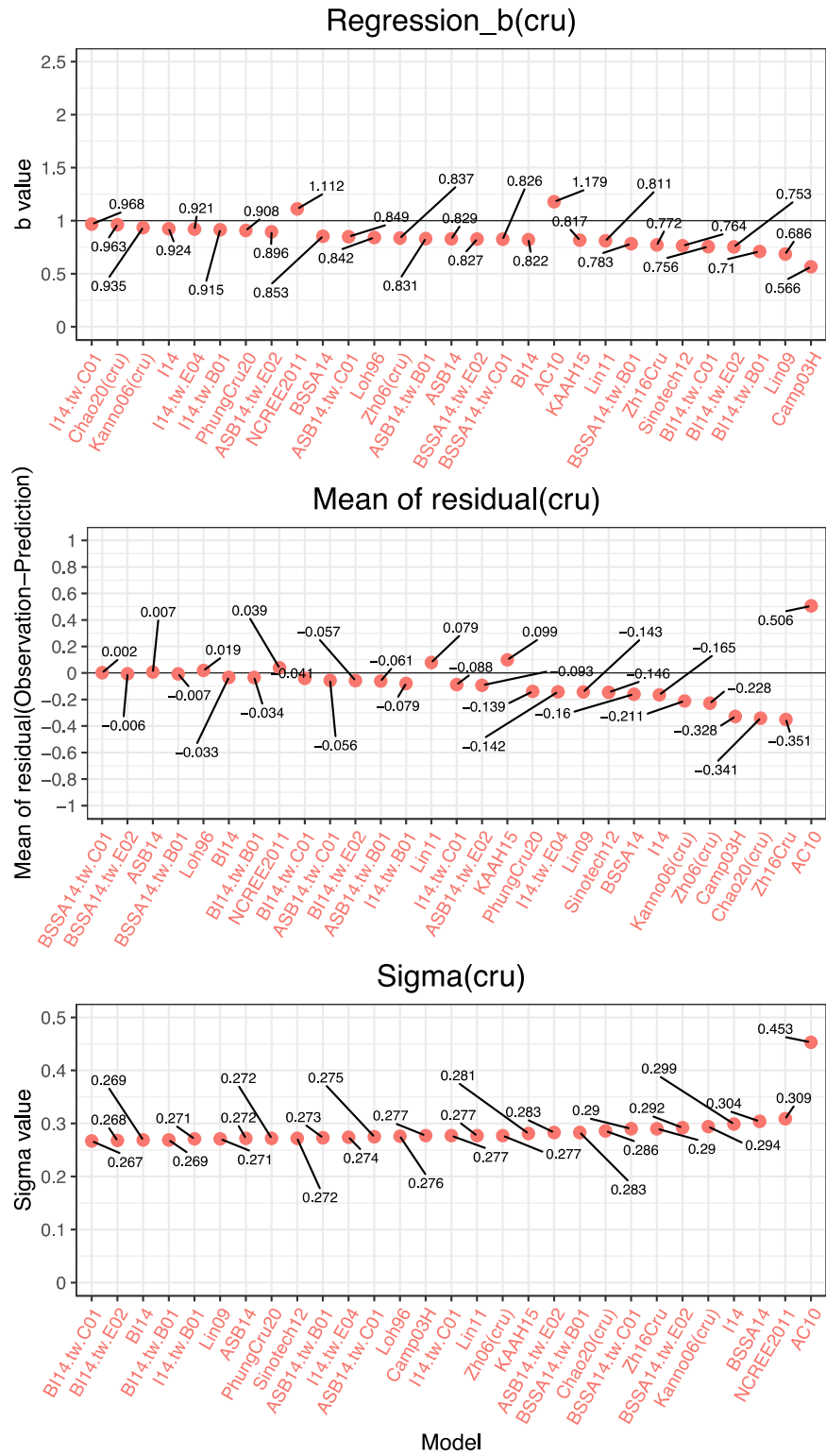


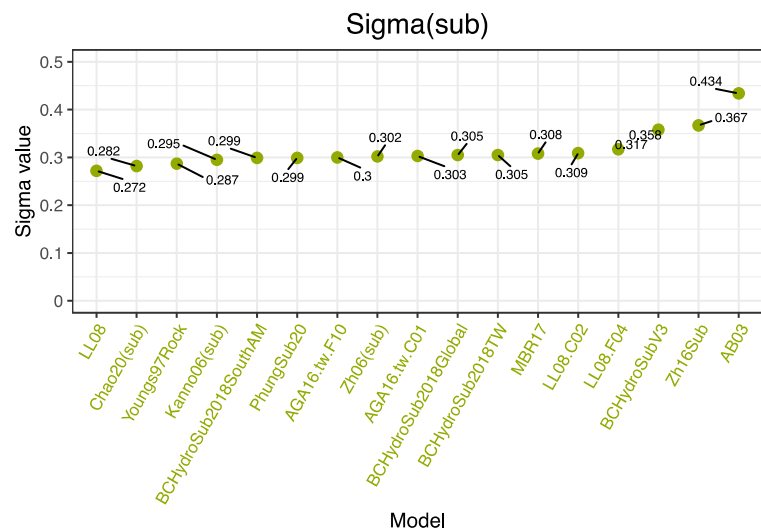
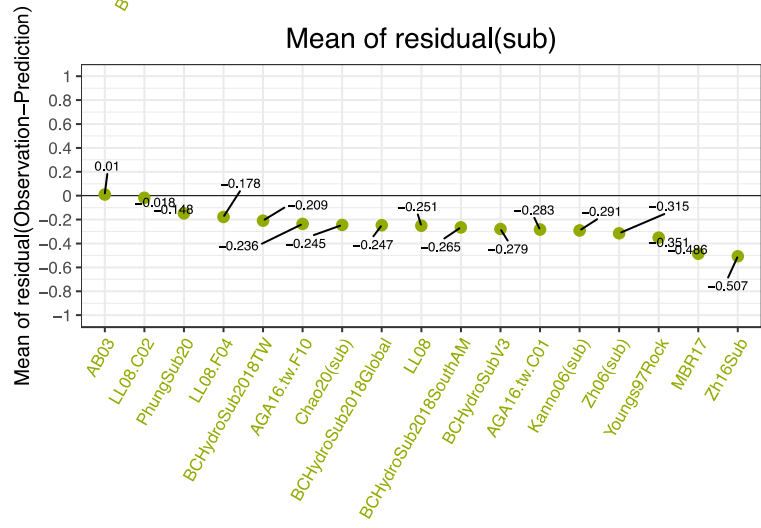


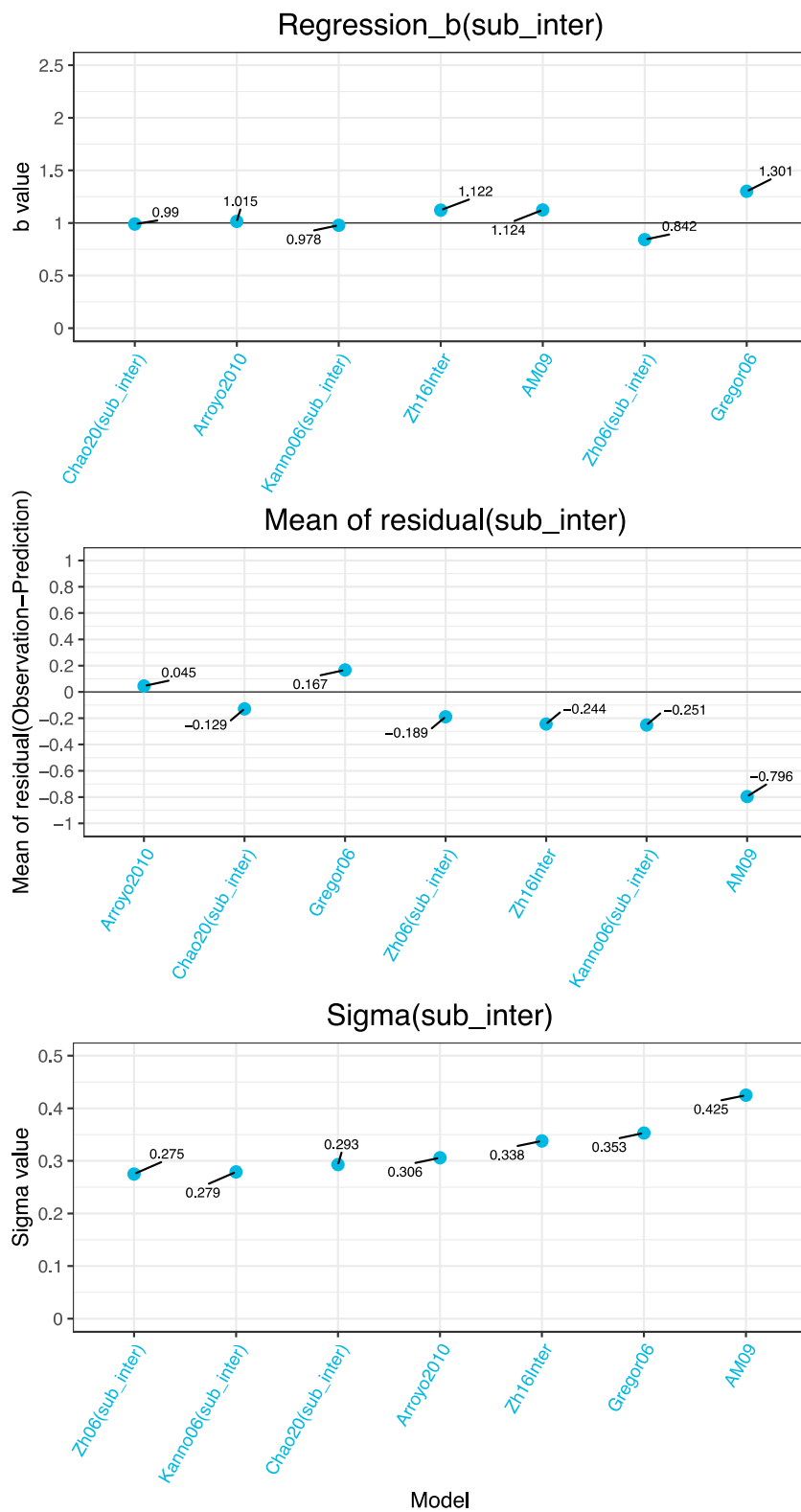


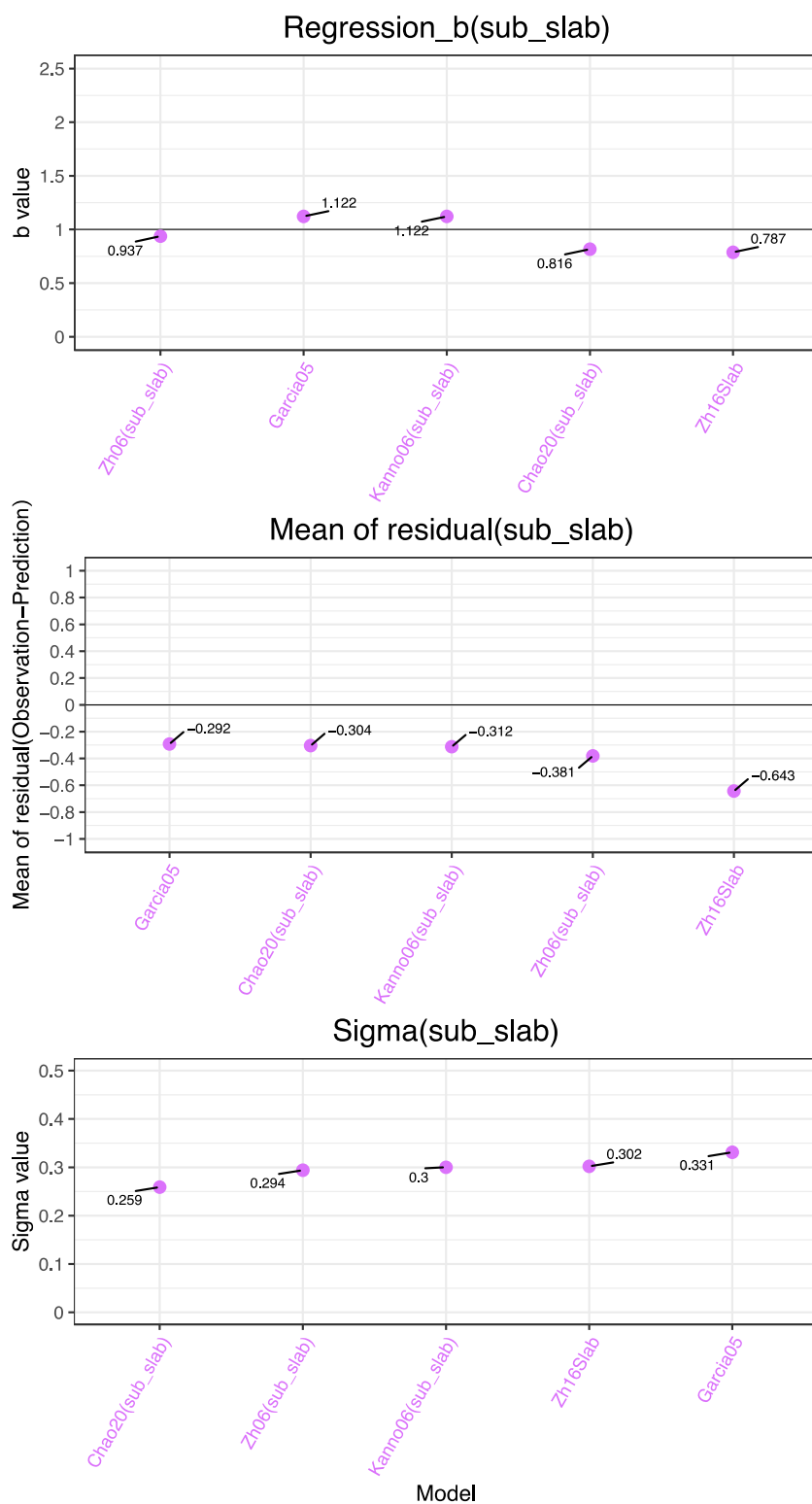
附錄 4

(本計畫所收錄之地動預估模型全震度比較圖)



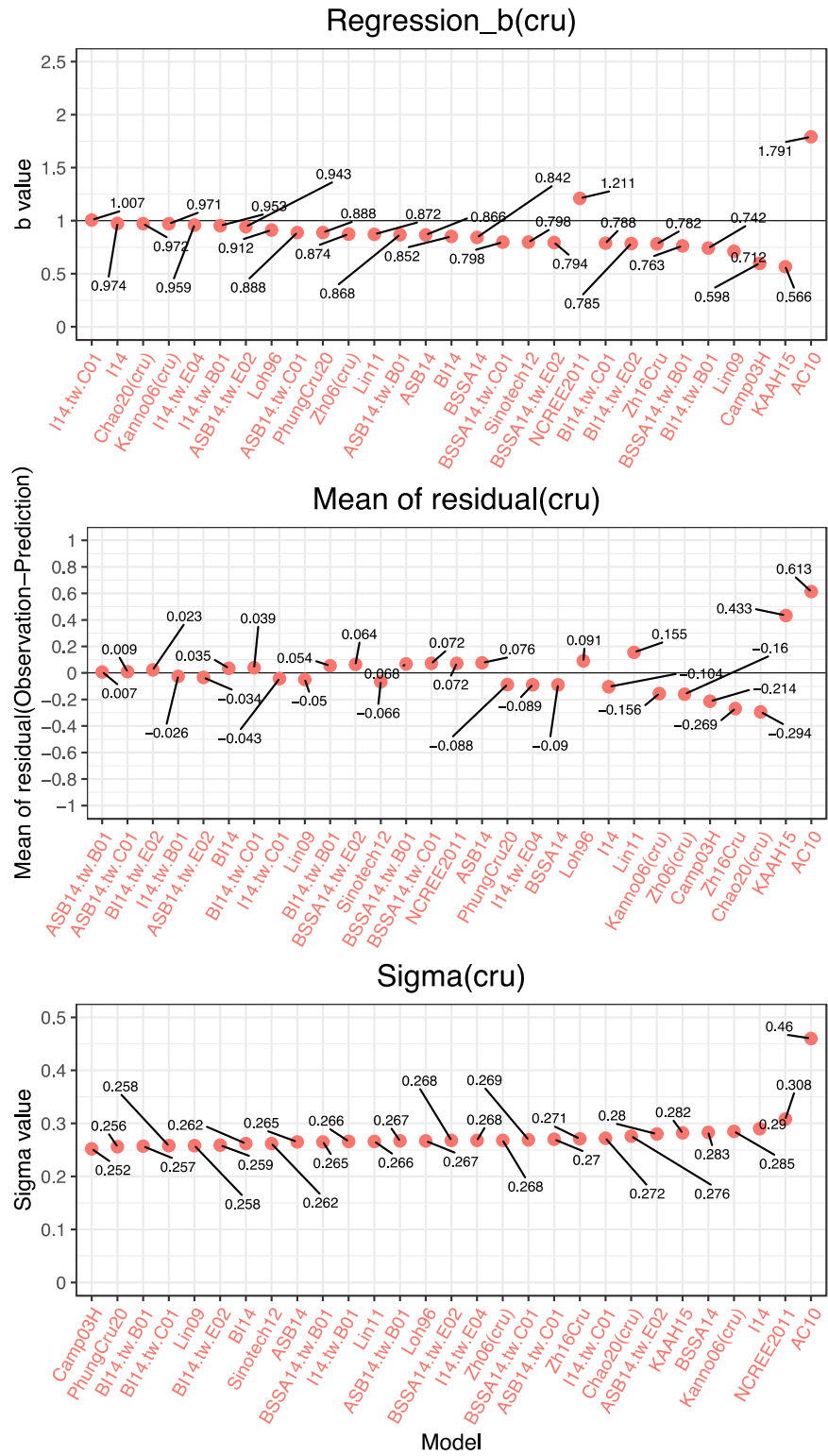


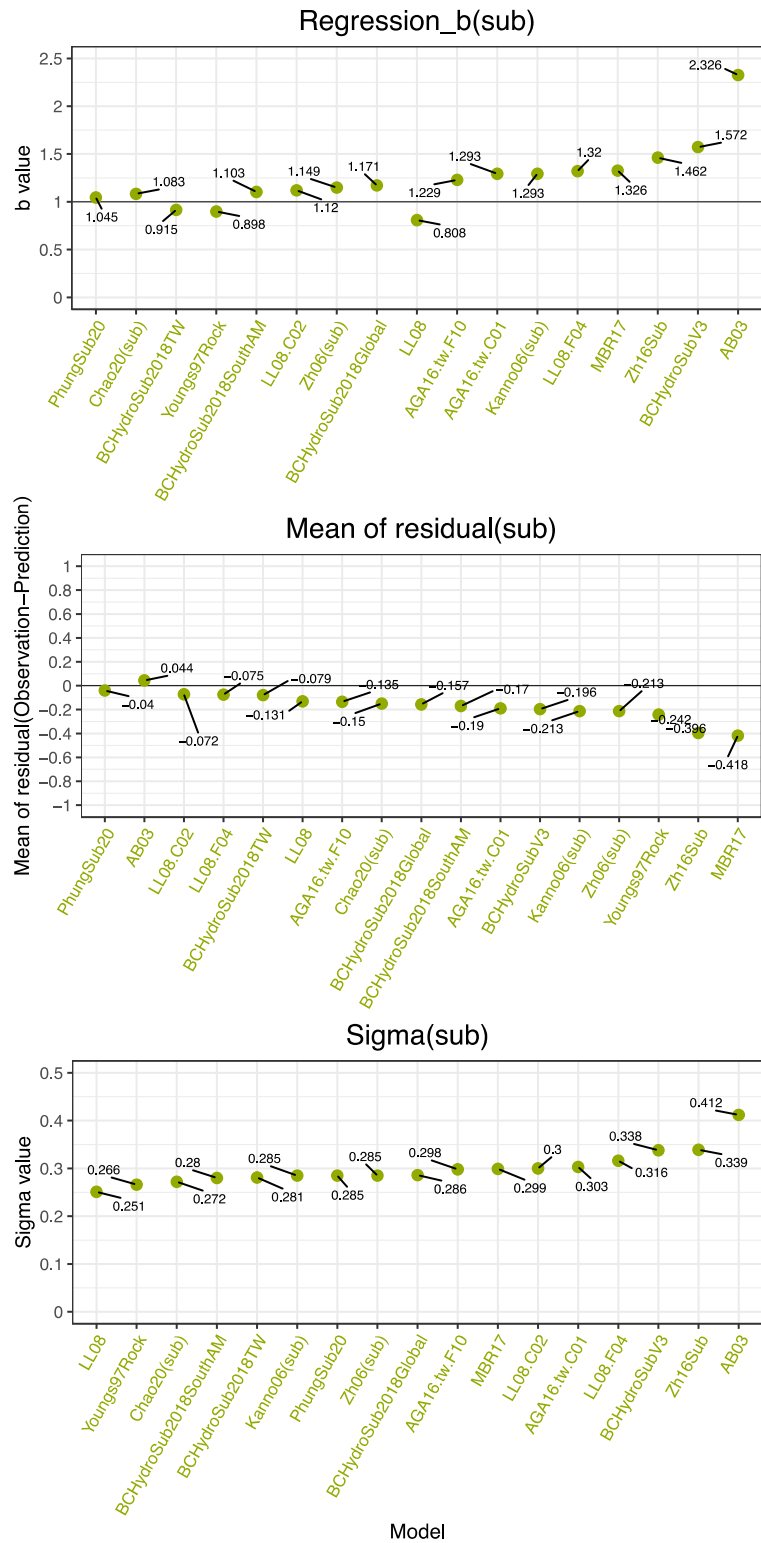


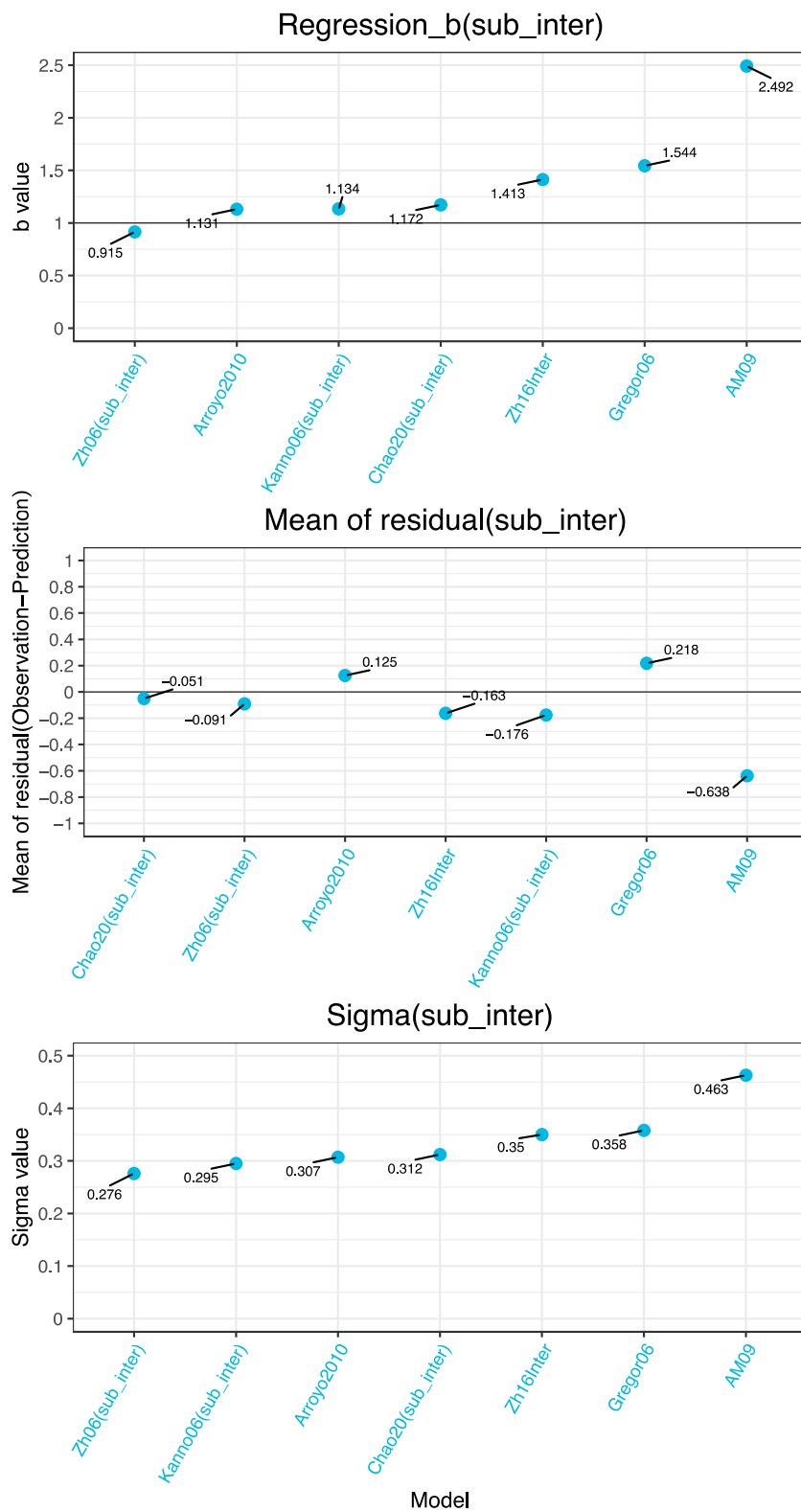


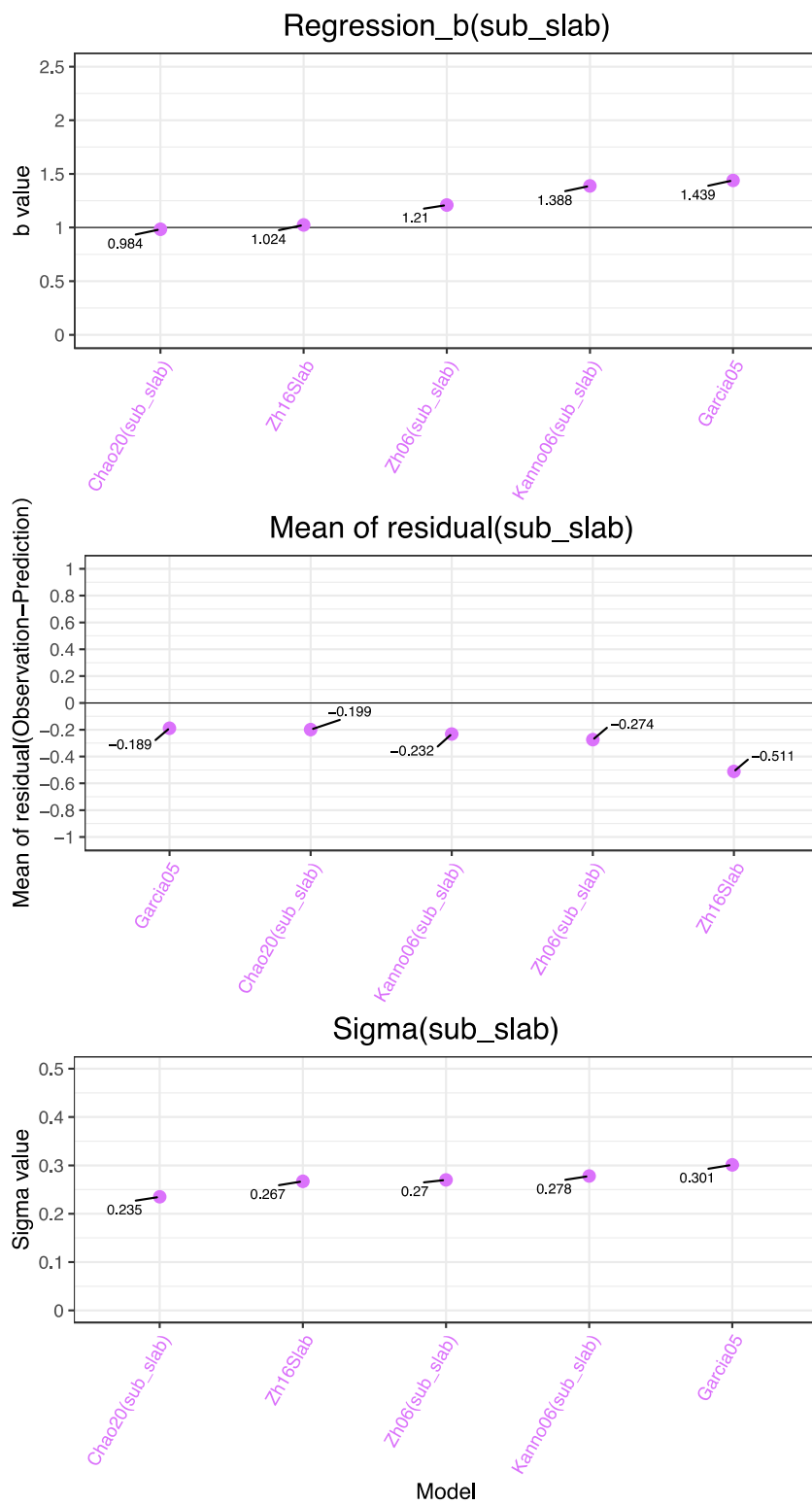
附錄 5

(本計畫所收錄之地動預估模型震度三級以上比較圖)









臺灣地區 112 年中大型地震震源資訊之快速彙整與提供

子計畫三

以 ETAS 模式分析臺灣區域地震發生之時空特性

詹忠翰 謝銘哲 呂奇祝

中華民國地球物理學會

摘要

本研究以傳染型餘震序列(epidemic-type aftershock sequence, ETAS)為基礎，在考量加入條件強度函數、參數估計方法、模式參數選擇等要件，並引入自我相似與分支過程概念，以統計學方法分析地震與地震間之時間與空間相關性，包含地震位置、規模期望分布、地震叢集與背景地震等因素，並嘗試討論將時空 ETAS 模式用於地震預報及前兆檢驗。本計畫預期採用傳染型餘震序列模式進行分析，透過彙整研析臺灣區域現有豐沛地震觀測目錄資訊，嘗試釐清地震序列中，地震規模分布、空間分布關係，並將成果用於探討是否可應用於預報臺灣地震活動時空特性，提出適用於預報臺灣地震活動時空特性之模式參數，期盼後續可提供給各相關機關單位參考，為我國防震減災策略提供建議。本研究現以隨機除叢法於國網中心之高速計算主機分析臺灣 1994 至 2021 年地震目錄，成功將地震活動區分為背景與叢集地震事件，此外，另根據機率分析結果分別計算 2022 年 01 月至 09 月之總體地震活動率、背景地震活動率與觸發能力等參數。作為驗證，本研究透過 ETAS 模式對 2022 年 09 月臺東地震序列進行分析，計算 09 月 17 至 25 日間地震觸發能力的變化。結果顯示，在關山前震($M_L6.6$)和池上主震($M_L6.8$)發生後，臺東地區的地震觸發能力明顯增強，以及形成沿縱谷分布之熱區，與後續餘震分布型態相符。

關鍵字：地震活動、傳染型餘震序列模型、地震叢集、2022 臺東地震序列

Abstract

In this study, we conduct a recent-developed epidemic-type aftershock sequence (ETAS) model, which accounts for more detailed derivations on conditional intensity probability, model parameterization and data fitting, and model selection. Furthermore, the concepts of self-similarity and the branching process are also introduced in the ETAS model. Thus, the ETAS model is an advanced-statistical model to analyze the spatiotemporal interrelationship between earthquakes, e.g., earthquake location, magnitude dependency, earthquake sequence and background event, etc. The method also has the potential for earthquake forecasting or precursor. In this project, we aim to compile earthquake catalogs and use the ETAS model to statistically analyze features of earthquake occurrence, including magnitude dependency and earthquake sequence, etc., and try to deliver a statistical model that fits the requirement for earthquake forecasting. In this study, we have implemented a stochastic de-clustering algorithm to analyze the Taiwanese earthquake catalog from 1994 to 2021 on the high-performance computing system at the National Center for High-performance Computing. It successfully distinguishes seismic activity into background and clustered earthquake events. Additionally, based on the probability analysis results, it calculates various parameters such as total seismic activity rate, background seismic activity rate, and triggerability for the period from January to September 2022. This study utilized the ETAS model to examine the 2022 Taitung earthquake sequence. We calculated the variations in triggerability from September 17th to 25th. The findings indicated a considerable rise in triggerability in the Taitung region following the Guanshan foreshock ($M_L6.6$) and the Chishang mainshock ($M_L6.8$). Additionally, a hot-spot zone emerged along the longitudinal valley, aligning with the distribution pattern of subsequent aftershocks.

Keywords: seismicity, epidemic-type aftershock sequence (ETAS), earthquake cluster, 2022 Taitung earthquake sequence

1. 研究目的

臺灣位處地震頻繁發生區域，從過去數百年來歷史文獻、數十年之地震定位紀錄可窺得中大規模致災性地震亦不再少數，如何從地震目錄中探求地震與地震間、地震與孕震構造間的關聯性一直為社會大眾所關注的議題，且影響我國對於地震防護策略之研議。有鑑於此，諸多學者專家積極探詢地震事件本身特性、事件與事件間關聯性，不斷以地球物理、地震學、統計學等領域技術分析地震活動特性，例如在大地震後透過有限斷層逆推(finite-fault inversion)，判識斷層面滑移量分布後，可進而圈繪地栓(asperity)區域，以庫倫應力變化(Coulomb stress change)模式解釋後續可能餘震分布型態與位置；此外，透過統計地震發生之規模一次數關係（即古騰堡－芮克特定律，Gutenberg-Richter law）與地震次數隨時間衰減關係（即大森－宇津公式，Omori-Utsu law）亦為參數化判識地震發生前後主餘震之時空特性。這些方法已應用於許多地震個案分析，然而對於臺灣而言，尚未有以統一標準分析臺灣數十年來地震目錄發震特性之通盤研究。

近年，以日本研究為發祥之傳染型餘震序列 (epidemic-type aftershock sequence, ETAS, Ogata, 1988; 1989)即以改良型大森公式作為發展基礎，加入條件強度函數、參數估計方法、模式參數選擇等要件，並引入自我相似與分支過程概念，以統計學方法分析地震與地震間相關性，包含地震位置、規模相依性、地震叢集與孤立事件等，並嘗試討論用於地震預報及前兆檢驗。本計畫將採用傳染型餘震序列模式進行分析，透過彙整研析臺灣區域現有豐沛地震觀測目錄資訊，建構本土化、適用於臺灣之時空 ETAS 參數模式，並探討特殊災害性地震事件之地震序列特徵，嘗試釐清單一地震序列中，地震規模分布、空間分布關係，並將成果用於探討是否可應用於預報臺灣地震活動時空特性之模式參數，期盼後續可提供給各相關機關單位參考，為我國防震減災策略提供建議。

2. 研究方法與步驟

本研究預計採用氣象署常年地震觀測目錄，透過時空 ETAS 模式針對所蒐錄地震資訊進行分析，研究方法與步驟包含「地震目錄資料蒐集與彙總」、「時空 ETAS 運算模式建立與驗證」與「發震潛勢區域判識」，以下就各步驟與工作項目進行說明。

2.1. 地震目錄資料蒐集與彙總

臺灣位處環太平洋地震帶，根據中央氣象署彙總與分析，臺灣每年平均約 1,000 次有感地震，並自 1900 年起計，至今災害性歷史地震已逾百次。本期「以 ETAS 模式分析臺灣區域地震發生之時空特性」研究計畫係基於分析地震目錄資訊，包含地震位置、地震規模、發震時間等訊息，藉由大數據分析方法，推估高發震潛勢區域，故地震目錄之取得與目錄完整性分析(如最小完備規模 M_c)，為本研究計畫之重要關鍵環節，後續並須藉此地震目錄作為基礎輸入時空 ETAS 模式之關鍵資訊，進行臺灣與鄰近區域範圍內，地震活動特性之時空特性分析。於計畫執行期間，本項工作預定蒐集中央氣象署地震目錄與前人對於地震目錄研究之相關文獻，分析氣象署地震目錄後，作為時空 ETAS 模式訓練之基礎輸入資訊。

2.2. 時空 ETAS 運算模式建立與驗證

對於研析地震目錄，若分析結果呈現地震事件之間於空間分布相鄰、發震時序有著先後次序的地震群，藉由地震規模大小關係，即可定義主震—餘震之地震序列。其中，通常定義主震(main shock)為地震序列中規模最大之事件，餘震(aftershock)則為主震之後的地震事件，多數情況下，餘震規模多小於主震，上述對於地震序列之描述，於統計地震學領域可以古騰堡-黎克特定律(Gutenberg-Richter Law, GRL, Gutenberg and Richter, 1944)與改良式大森—宇津定律(Modified Omori-Usui Law, MOL, e.g. Omori, 1894; Utsu, 1961; Utsu et al., 1995)表示，分別為描述地震之規模相對地震發生次數呈指數衰減，以及主震後歷經時間對於累計次數呈指數衰減。

本研究預計將導入「傳染型餘震序列」(epidemic-type aftershock sequence, ETAS, e.g. Ogata, 1988; Zhuang et al., 2002; Zhuang et al., 2004; Omi et al., 2013)技術，該技術推廣與應用 GRL 及 MOL 關係，並基於統計學與流行病學理論，透過選定特定時空範圍內之地震分布，透過隨機除叢(stochastic declustering)技術將地震時空分布拆解為「地震叢集」與「背景地震」總合。此外，ETAS 模式亦採用了評估參數、校驗是否過適擬合(overfitting)，例如 Ogata (1988)即已納入赤池訊息量準則(Akaike information criterion, AIC)，對過適擬合之資料進行嚴格檢視並濾除，從資料探勘(data mining)的角度最佳化、分析地震事件間的機率關係，因此就資料科學角度而言，已然是採用近年蔚為潮流之 AI 演算技術；為分析大量地震事件資料，ETAS 模式計算亦仰賴高速運算(high performance computing, HPC)技術，透過將大量地震定位資料分配給各運算節點，透過分散計算、資料集結、統合計算結果等手段，才能達成單機電腦無法處理的大量運算。

分支過程(branching processes)模型可用於描述地震活動之時間與空間分布特

性，以及是否可將所選取之地震事件視為叢集。基於點過程(point processes)理論的 ETAS 模式應用並擴充大森定律，即假設每個地震事件將以一定機率條件觸發「子地震」事件，藉由該過程來描述地震活動時空叢集與序列特徵(圖 1)。

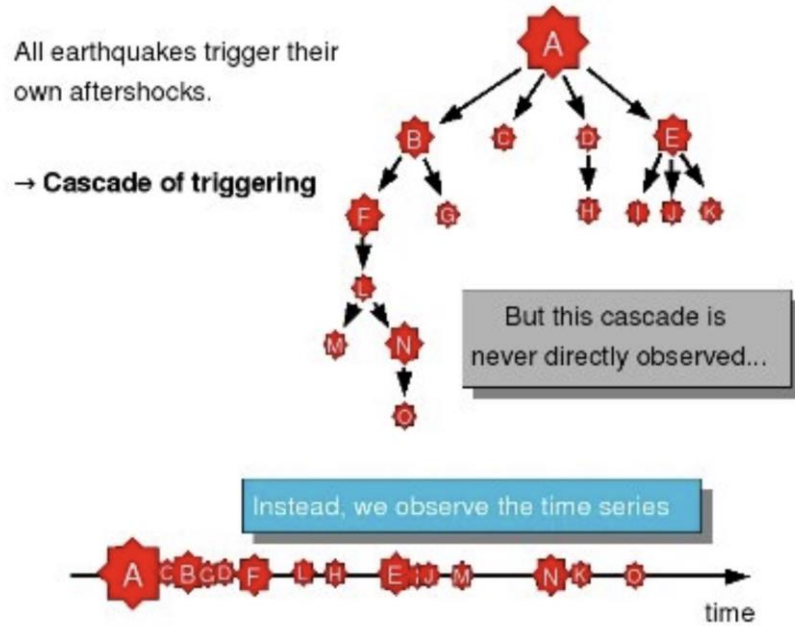


圖 1 由分支過程探討地震事件間之關聯性

圖為舉例地震 A(第一代)觸發地震 B、C、D、E(第二代)，地震 B 又觸發地震 F、G(第三代)

(本圖摘自 <https://www.isterre.fr/annuaire/pages-web-du-personnel/david-marsan/article/model-independent-stochastic-declustering.html>)

Ogata(1998)定義之時空 ETAS 模式將地震發生率 λ 表示為：

$$\lambda(t, x, y) = \mu(x, y) + \sum_{i: t_i < t} \kappa(m_i) g(t - t_i) f(x - x_i, y - y_i; m_i) \quad (1)$$

其中， $\mu(x, y)$ 為背景地震活動強度，即背景地震發生率，背景地震是與時間無關的

空間位置的函數； $\kappa(m)$ 則為規模 m 地震事件觸發子地震數量之期望值； $g(t)$ 和 $f(x,y;m)$ 分別為子地震之時間與空間機率密度函數，前述三項分別可表示為

$$\kappa(m) = Ae^{\alpha(m-m_c)}, m \geq m_c \quad (2)$$

$$g(t) = \frac{p-1}{c} \left(1 + \frac{t}{c}\right)^{-p}, t > 0 \quad (3)$$

$$f(x,y;m) = \frac{q-1}{\pi D e^{\gamma(m-m_c)}} \left(1 + \frac{x^2 + y^2}{D e^{\gamma(m-m_c)}}\right)^{-q} \quad (4)$$

各式中 A 、 α 、 p 、 q 、 D 、 γ 與 c 為常數，而 m_c 為計算之最小完備規模。此外，假設地震規模之機率密度函數為

$$J(m) = \beta \exp[-\beta(m - m_c)] \quad (5)$$

其中 β 與 GRL 中之 b 值關係為 $\beta = b \ln 10$ 。前人相關研究中，如 Zhuang et al. (2002) 與 Zhuang & Ogata (2006) 所發展的隨機除叢法(stochastic declustering)，地震事件 i 對於之後發生於 j 處 (t_j, x_j, y_j) 之地震發生率，或稱觸發地震 j 的機率可表示為

$$\rho_{ij} = \frac{\zeta_i(t_j, x_j, y_j)}{\lambda(t_j, x_j, y_j)}, j > i \quad (6)$$

其中， $\zeta_i(t,x,y) = \kappa(m_i) g(t-t_i) f(x-x_i, y-y_i; m_i)$ ，而地震 j 作為背景地震之機率為

$$\varphi_j = \frac{\mu(x_j, y_j)}{\lambda(t_j, x_j, y_j)} \quad (7)$$

由背景地震機率可用核函數(kernel function)來估算地震背景活動強度 $\mu(x, y)$ ，即

$$\hat{\mu}(x, y) = \frac{1}{T} \sum_j \varphi_j Z_{h_j}(x - x_j, y - y_j) \quad (8)$$

其中 T 為地震目錄收錄時間段， Z_{h_j} 是帶寬為 h_j 的高斯核函數。帶寬變數 h_j 為地震 j 到第 n_p 個最近地震的距離，一般選取 $n_p=4$ 。

總結而言，基於時空 ETAS 模式所衍生之隨機除叢法，對於實際地震目錄 $\{(t_i, x_i, y_i, m_i): i=1, 2, \dots, N\}$ 而言，評估待估參數之迭代流程如下：

步驟(1) 若給定條件強度函數 $u(x, y)$ ，則背景地震活動強度可以以下形式表示為

$$\mu(x, y) = \nu u(x, y), \text{ 其中 } \nu \text{ 為大於 } 0 \text{ 之待估參數。}$$

步驟(2) 透過最大概似估計(maximum likelihood)估算公式(1)中的各項參數。

步驟(3) 將個參數帶入公式(7)，求得每個地震為背景地震機率 φ 。

步驟(4) 由公式(8)重新計算 $u(x, y)$ ，反複迭代直至結果收斂。

上述過程即可同時求取背景地震活動強度 $\mu(x, y)$ ，以及模式參數 $\{\nu, A, \alpha, p, q, D, \gamma, c\}$ ，進而計算 $\zeta(t, x, y)$ 達到除叢集之目的。透過上述方程式，即可了解時空 ETAS 模式考慮於地震目錄所選取之時間段中，所有地震事件之綜合觸發效應，而地震叢集也不僅包括餘震，亦包涵前震和震群，形成地震序列。此外，上述模式僅以統計學與點過程考量平面上之地震活動分布，並未考量地震隨深度變化、以及斷層面大小或其他斷層運動學與動力學參數，因此須以二維 ETAS 模式視之。

2.3. 發震潛勢區域判識

由前述 2.2 節公式(1)，可了解 ETAS 模式即在於分析具一定時空分布範圍之總體地震活動 $\lambda(t, x, y)$ 、背景地震活動 $\mu(x, y)$ ，因此分析單位時間內之量值變化，則可視為分析該地震目錄之總體地震活動率與背景地震活動率。而後，經計算與迭代求得時空 ETAS 參數後，將得到反應該區域地震活動特徵之參數，即以機率方式呈現

任何地震都可能為背景地震，或由前次地震所觸發。若我們將空間劃分為諸多網格點位，計算每個網格點之 $\zeta_i(t, x, y; t_i, x_i, y_i, m_i) = \kappa(m_i) g(t-t_i) f(x-x_i, y-y_i; m_i)$ ，即計算「過往地震事件」觸發「位於特定格點之地震事件」的貢獻與能力，本研究以觸發能力(triggerability)稱之， ζ 單位為 events/day/deg²，以其作地震預報之基礎。經由上述分析模式，即可自地震目錄萃取出特定時空範圍內地震活動特性，並識別出反應該目錄地震時空分布特性之發震潛勢區域，暗示可能作為評估下一起地震事件發生的位置之潛勢參考。

3. 研究成果

3.1. 地震目錄蒐集與彙總

因 ETAS 模式計算之核心概念為地震目錄分析，因此本研究須預先蒐集地震目錄資訊以供分析使用。本研究自中央氣象署「臺灣地震與地球物理資料管理系統」(Taiwan Geophysical Database Management System, 簡稱 GDMS <https://gdms.cwa.gov.tw/index.php>)檢索自 1973 年 01 月至 2022 年 12 月之地震事件，檢索範圍設定為東經 119.8 度至 122.5 度、北緯 21.7 度至 25.6 度，該空間範圍設定將詳述於 3.3 節，經由以上資訊進行資料庫檢索，一共取得 825,816 筆地震事件紀錄。圖 2 為 1973 年以來之地震事件於空間之分布，圖 3 為地震規模相對地震次數之直方圖。

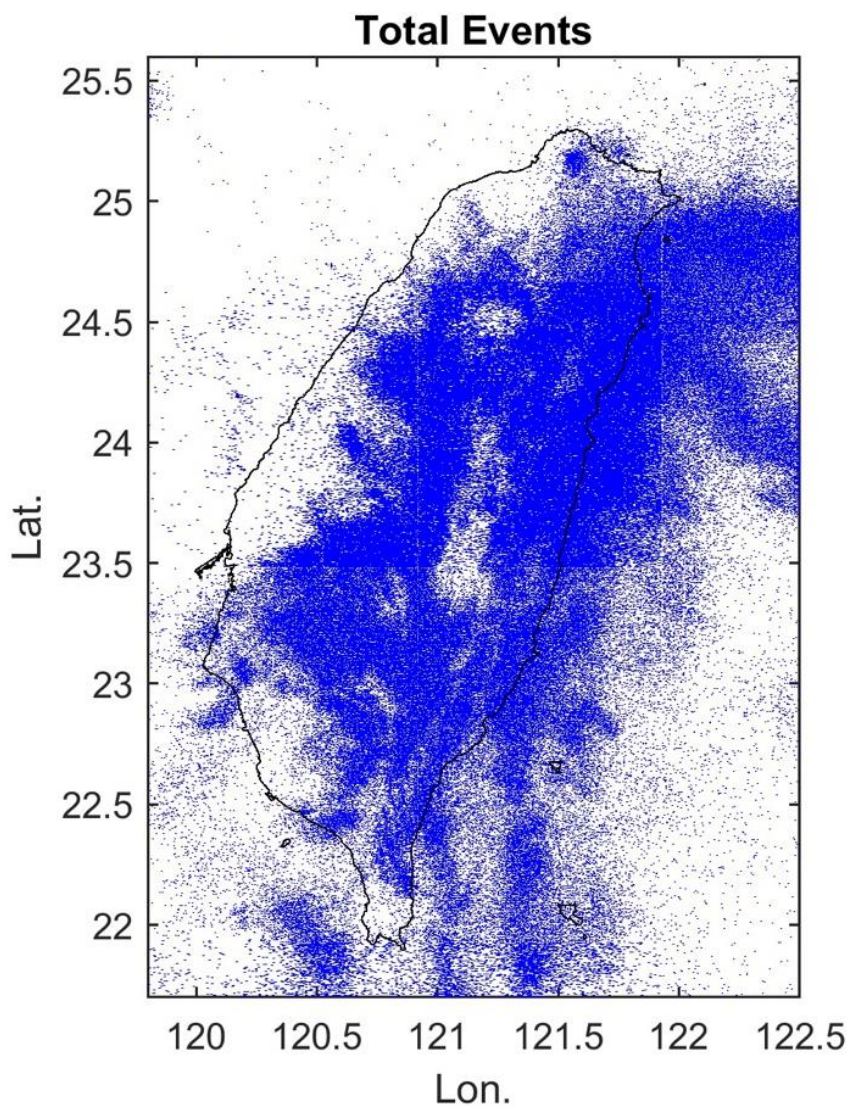


圖 2 本研究選取範圍之地震活動分布

地震事件係由中央氣象署「臺灣地震與地球物理資料管理系統」檢索地震目錄後取得

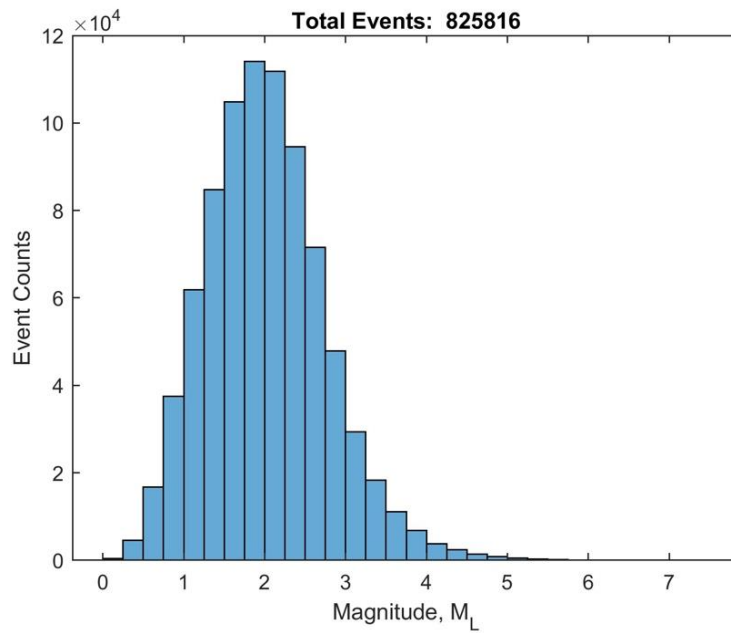


圖 3 所有地震事件之規模相對於地震次數之分布直方圖

3.2. 運算 ETAS 模式計算環境設置

本研究計畫採用之 ETAS 演算法源自 Zhuang *et al.* (2002) 之隨機除叢(stochastic declustering)技術，僅考慮地震在水平面上分布、無深度變化之演算法，因為同時必須處理大量地震資料，因此在單一電腦或工作站礙於 CPU 性能與記憶體大小而無法執行，故本研究採用國研院國家高速網路中心(National Center for High-performance Computing, NCHC，簡稱國網中心)之「臺灣杉一號」高速計算主機進行隨機除叢與 ETAS 模式參數回歸。根據國網中心刊載資訊(https://iservice.nchc.org.tw/nchc_service/nchc_service_hpc.php)，全系統共計 30,000 計算核心、平行檔案系統總容量為 3.4PB，搭配 OPA 100Gbps 高速網路，整體效能可達 1.49 千兆次浮點運算(PFLOPS)，為具有大量計算節點與獨立檔案系統空間之泛用型計算主機，可提供多種領域的計算服務，包含物理、化學、數學、大氣科學、工程應用、生命科學等，故國網中心之臺灣杉一號高速計算主機適用於本研究計畫。

本研究採用之 ETAS 演算法為以 Fortran 77 撰寫之程式碼，並結合 MPICH2 標準進行平行化設置，因此系統環境須包含設置 Fortran 編譯器(GNU Fortran 或 Intel Fortran)、OpenMPI 或 MPICH2 函式庫等配置，待編譯完成式後即可在平行計算之環境下進行模式演算。計算效能評估方面，設定測試資料集共 72,485 筆地震定位紀錄，以隨機除叢解算該資料集所包含地震事件之母子關係，並同時解算總體地震活動率、背景地震活動率、觸發能力等參數，參數回歸時採用最大似然估計(maximum likelihood estimation, MLE)方法，數值迭代設定為 3 次作為收斂目標，以使用 384 計算核心進行運算約需 52 分鐘；而若已有訓練好的 ETAS 模式參數，以該參數組合直接進行隨機除叢與總體地震活動率、背景地震活動率、觸發能力等參數之計算，可將使用核心數由 384 計算核心降低為使用 96 計算核心，計算需耗時約 16 分鐘。

3.3. 運算 ETAS 模式參數設置

在進行 ETAS 參數回歸前，須預先擇定俱代表性地震活動時空分布範圍，方能有效進行參數回歸，否則可能致使回歸結果無法收斂、或是將不同地體單元構造納入回歸而不具統計意義。基於以上緣由，本研究參考 Cheng *et al.* (2015)，考量其以是否為淺層地殼型地震作為地震帶劃分(zoning scheme，圖 4)依據，建構資料回歸空間範圍如圖 5 所示，且根據地震帶劃分，最終選定東經 119.8 度至 122.5 度、北緯 21.7 度至 25.6 度之地震定位紀錄，並在經度方向劃分為 81 個格點、緯度方向劃分為 201 個格點，後續總體地震活動率、背景地震活動率、觸發能力等參數估計皆以此 81x201 格點進行運算與輸出。關於地震目錄之時間段選取，因中央氣象署之即時資料於 1994 年時由觸發式改為連續記錄式，完整的地震儀波形紀錄致使地震波形與到時辨識更加準確，地震監測數量由每年平均 4,000 個大幅增加至 20,000 個，大幅提升臺灣地震監測的能力，故本研究於使用地震目錄時，皆採用 1994 年後之地震定位紀錄。此外，根據 Cheng *et al.* (2015) 研究，臺灣自 1973 年後之地震目錄完整性規模(magnitude of completeness, M_c)為 2.0-3.0，本研究參考 Cheng *et al.* (2015)，保守選取 $M_c=3.0$ 作為地震目錄完整性規模。

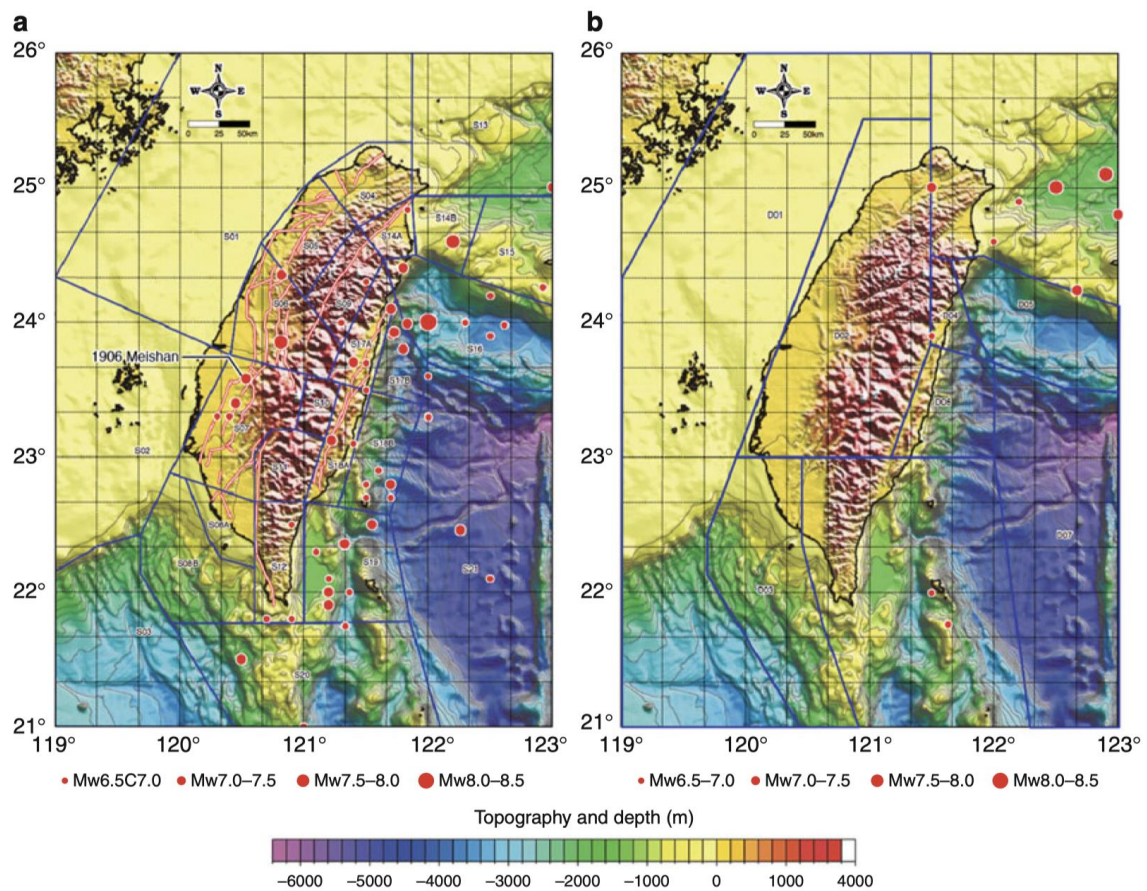


圖 4 臺灣地震活動分區圖

(a)深度 ≤ 35 km 之淺層地震與(b)深度 > 35 公里深部地震之地震活動劃分(藍實線)(摘自 Cheng *et al.*, 2015)

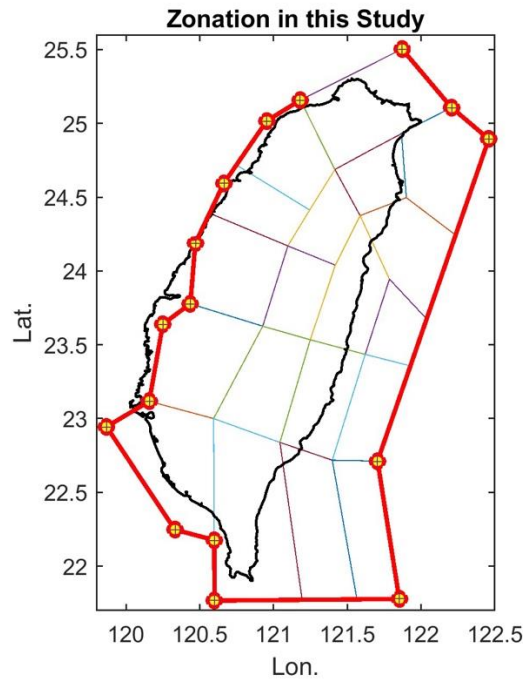


圖 5 根據 Cheng et al. (2015)畫分出地殼地震活動區間(紅色連線)

對於 ETAS 模式參數回歸而言，根據 2.2 節敘述，共有 8 個參數必須進行回歸，包含： μ 、 A 、 α 、 p 、 q 、 D 、 γ 、 c 為常數，同時回歸 8 個參數對於數值方法來說常會發生結果收斂於區域極值而非全域極值，故在進行參數回歸的過程，以數值迭代方式求解將有助於待回歸參數收斂；進行參數回歸時可同時估計背景地震活動率，須設置一高斯核函數帶寬 h_j 與最近 n_p 個地震進行計算，通常 h_j 設置與地震定位誤差有關，而 n_p 則通常設定為 3-5 即可。以本研究而言，根據氣象署地震目錄之定位誤差欄位為 2-3 公里，選定 $h_j=3$ (km)，而 n_p 則設定為 5 進行最大似然法搜尋參數，通常設定迭代 3 至 7 次可得到穩定收斂之結果。

3.4. 隨機除叢案例討論：以 2022 年 01 月 01 日為例

本研究所採用之 ETAS 演算法，可任意指定時間視窗，指定參數回歸起始時刻點與截止時刻，本節以 2022 年 01 月 01 日為參考時間點為例，即設定回歸 ETAS 參數之時間視窗為 1994/01/01 00:00:00 至 2021/12/31 23:59:59 (UTC Time)，進行隨機除叢，以及計算總體地震活動率、背景地震活動率、觸發能力等，最終回歸出 ETAS 參數如表 3.4-1 所示。

表 1 ETAS 參數回歸

	μ	A (counts/day)	C (day)	α	p	D (deg ²)	q	γ
初始參數	0.5636	1.2568	0.0012	1.1294	1.0187	0.0007	2.2713	0.3473
輸出參數	0.5098	0.6188	0.0031	1.1733	1.0616	0.00005	1.5934	0.6786

以隨機除叢法而言，概念係將特定時空分布之所有地震事件區分為「背景事件」(background event)與「叢集事件」(cluster event)。背景事件係指在空間特定位置將

重複發生，但與鄰近地震事件並無顯著關聯之地震事件；叢集事件泛指地震與地震間具有一定因果關係，即母世代事件觸發子世代事件、子世代事件觸發孫世代事件，事件間具有較高之機率關係。一般而言，劃分「背景事件」與「叢集事件」之機率閾值多設定在 0.3-0.5 之間，而本研究則取 0.5 作為為閾值區分兩類事件之依據。圖 6 至圖 14 顯示，隨機除叢將 1994-2021 間之所有 $M_L \geq 3.0$ 之地震活動共 44,011 筆事件，區分為 16,540 個背景地震事件與 27,471 筆叢集事件，其中，圖 9 至圖 11 呈現東部菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊邊界、沖繩海槽皆有顯著且常態性之背景地震活動，臺灣北部竹苗地區、中部南投地區、南部麓山帶區域亦有常態性背景地震活動，圖 11 即支持上述說法，在背景地震累計次數上為一平直線，無明顯在某時刻地震數量突然增加之現象，表示隨機除叢法可有效將背景地震活動由地震目錄中分離出來；另，根據圖 13 與圖 14 顯示集集地震後致使臺灣中部叢集地震活動大幅增加，明顯使地震數量大幅躍升，且約略歷時 2 年之久；此外，於東經 121.5 至 122 度、北緯 23.5 至 24.5 度區域(約於北花蓮區域)亦多有叢集地震事件發生，近年數起發生於花蓮之規模 6 以上地震事件即可驗證此地震活動行為；而中央山脈南段至臺東區域、臺灣東南外海往菲律賓方向，亦可明顯辨識叢集地震活動。以上論述可見以隨機除叢法對地震目錄進行分析，可釐清選定時間段中地震事件，與其觸發子世代地震、孫世代地震之間時空關聯性，達到有效除叢集，或有效萃取地震序列之目的。

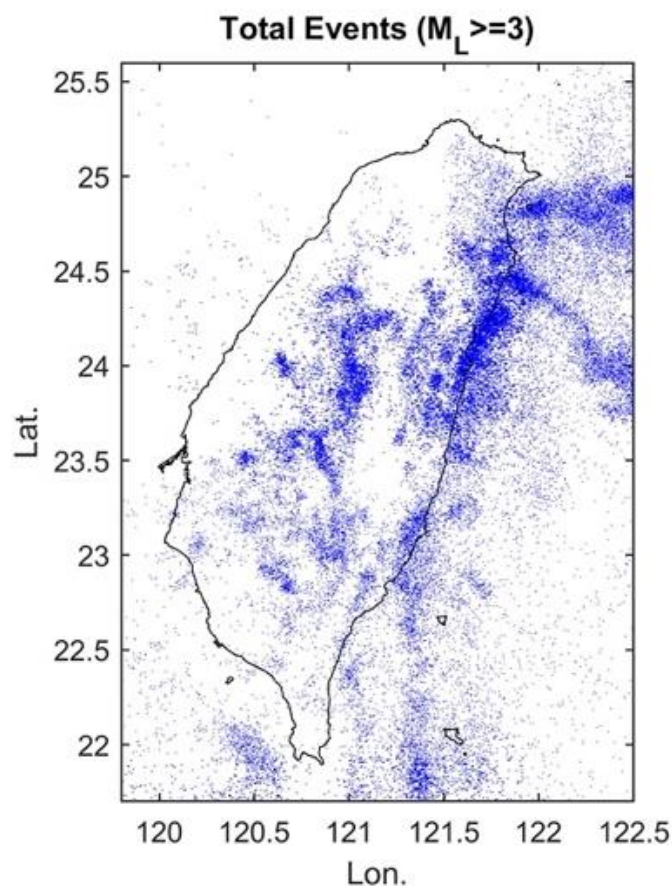


圖 6 1994-2021 年之地震活動空間分布($M_L \geq 3.0$)

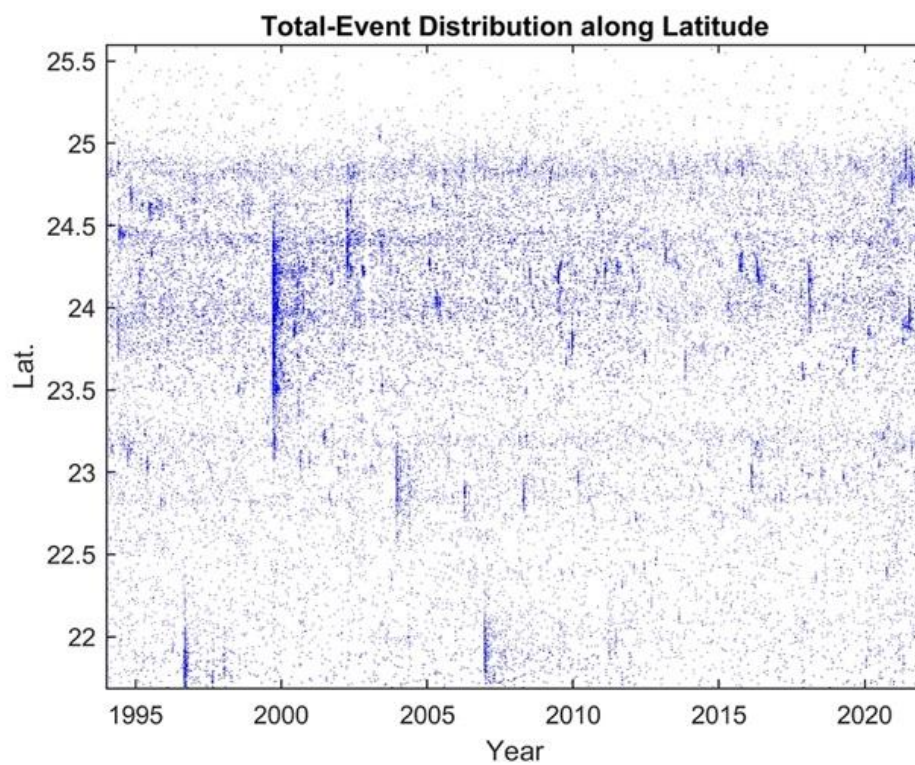


圖 7 1994-2021 年之地震活動隨時間沿緯度方向分布($M_L \geq 3.0$)

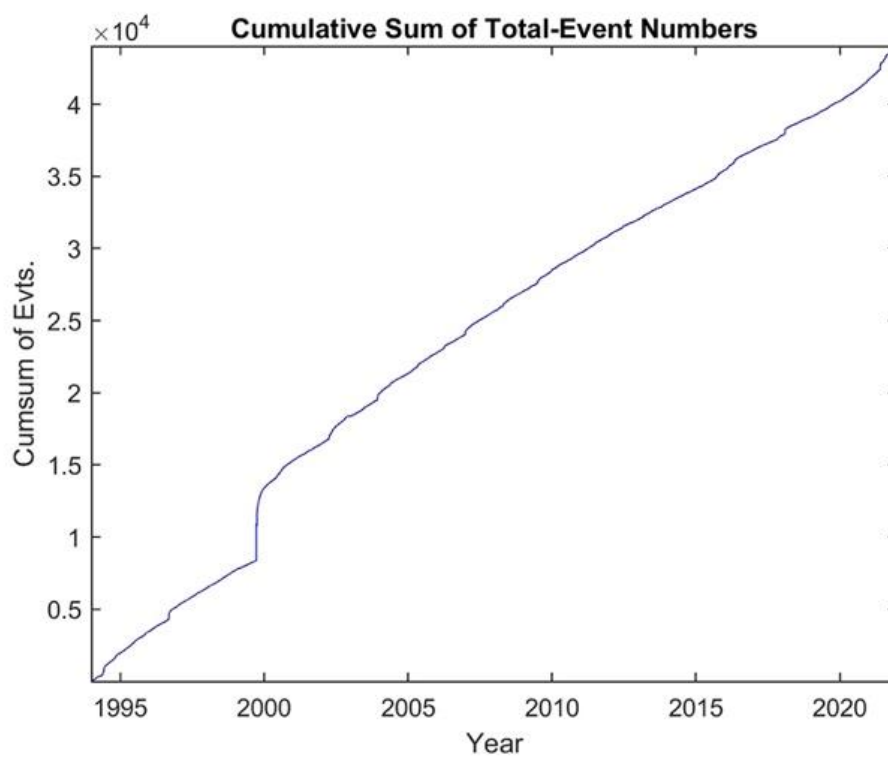


圖 8 1994-2021 年之地震活動隨時間對地震累計次數分布($M_L \geq 3.0$)

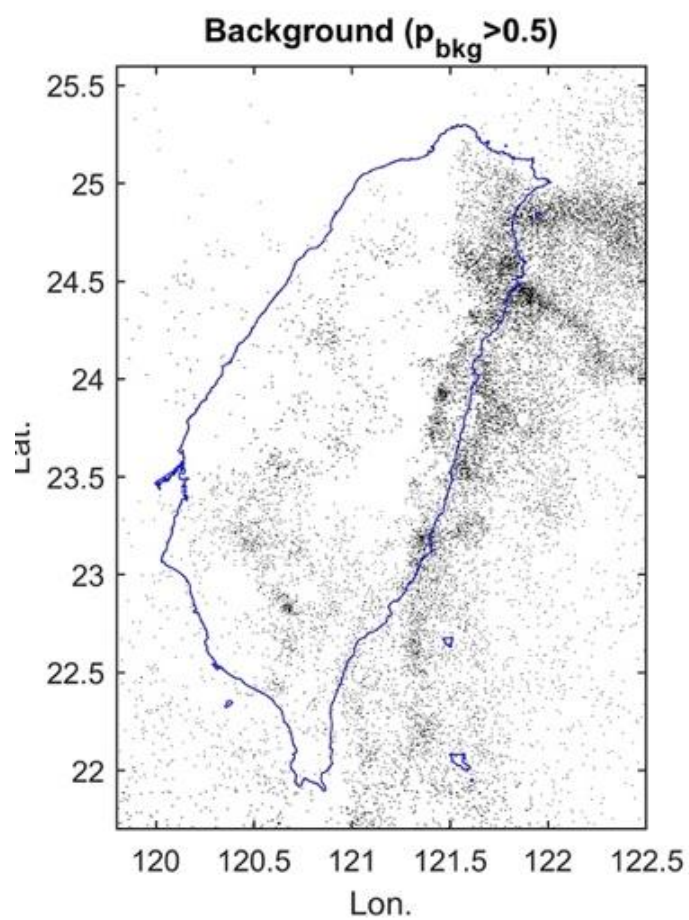


圖 9 1994-2021 年之背景地震活動空間分布($M_L \geq 3.0$)

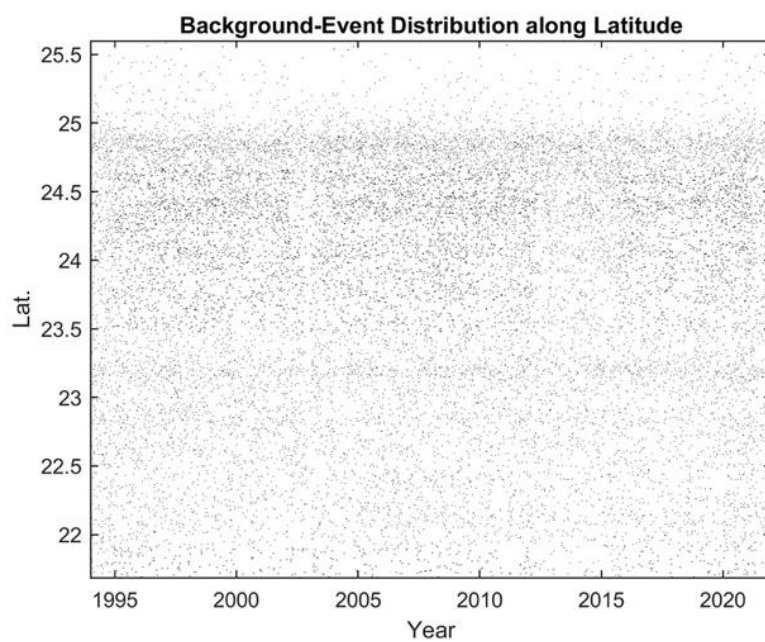


圖 10 1994-2021 年之背景地震活動隨時間沿緯度方向分布($M_L \geq 3.0$)

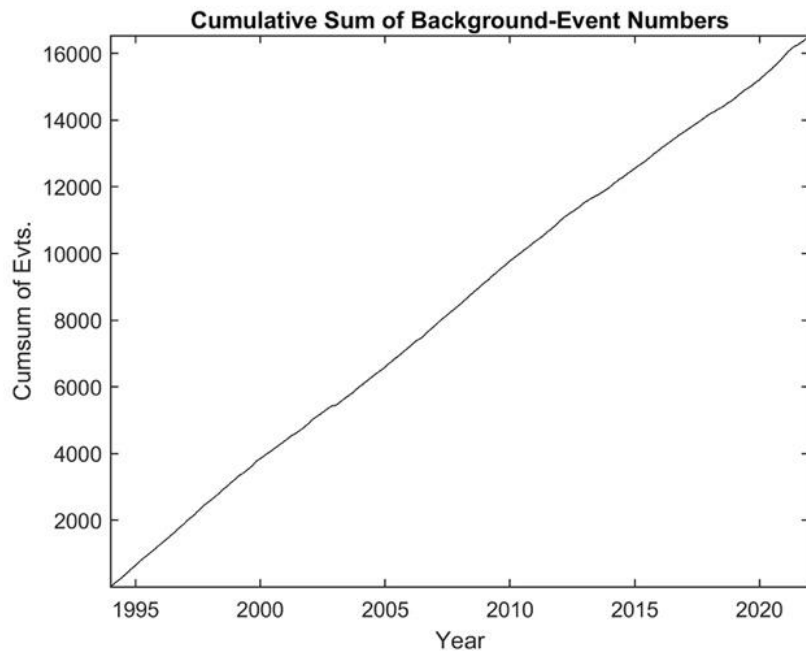


圖 11 1994-2021 年之背景地震活動隨時間對地震累計次數分布($M_L \geq 3.0$)

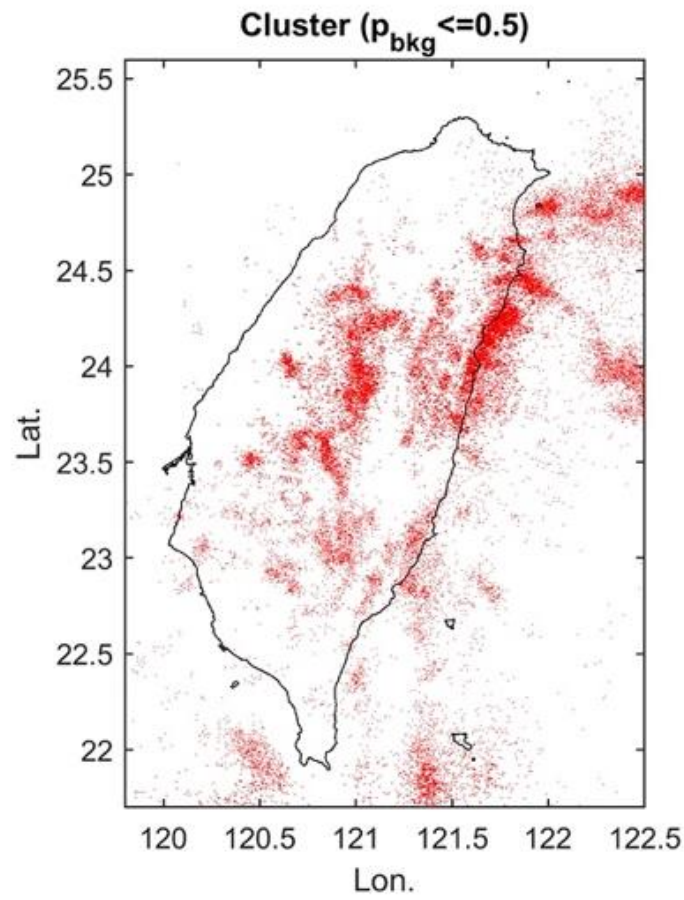


圖 12 1994-2021 年之叢集地震活動空間分布($M_L \geq 3.0$)

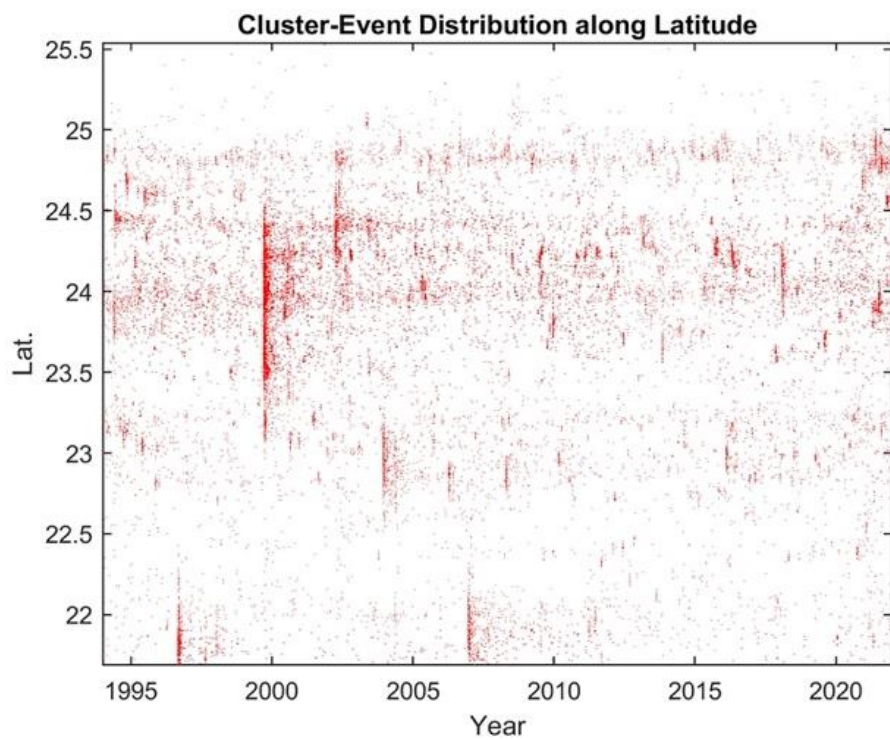


圖 13 1994-2021 年之叢集地震活動隨時間沿緯度方向分布($M_L \geq 3.0$)

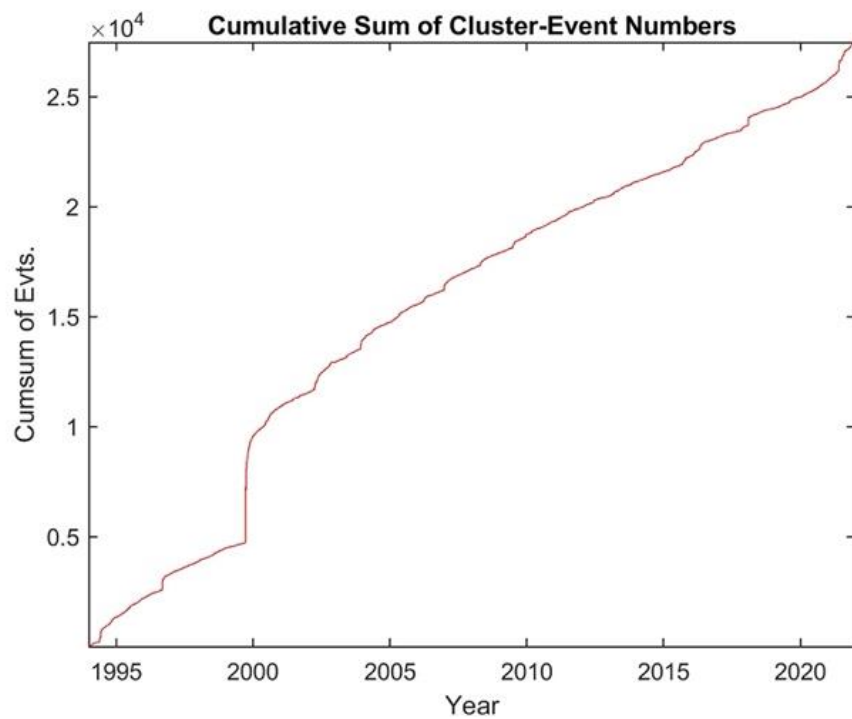


圖 14 1994-2021 年之叢集地震活動隨時間對地震累計次數分布($M_L \geq 3.0$)

3.5. 地震活動率判識案例討論

3.4 節呈現隨機除叢法對於分離背景地震與叢集地震具有相當成效，而本節著眼於隨著 ETAS 參數回歸後，可在空間網格點位上估算總體地震活動率、背景地震活動率，並計算觸發能力，其強度可能與接下來的地震活動有關，若技術發展與資料處理流程足夠成熟且穩定，或可用於地震預報工作。

本研究針對目標區域，即 3.3 節所述經緯度範圍與其劃分為 81×201 網格點，由 2.2 節所述流程步驟，於隨機除叢過程同時推估地震活動率，本節同 2022 年 01 月 01 日為例，計算 1994/1/1 00:00:00 至 2021/12/31 23:59:59 (UTC Time) 之地震活動率，總體地震活動率與背景地震活動率分別於圖 15 與圖 16 呈現，與 3.4 節所述總體與背景地震活動相同，僅為將地震數量對應至網格點位並以色階表示，色階強度顯示地震活動多寡；圖 17 則呈現該時間點之地震觸發能力，圖中顯示花蓮縣北邊有較強之觸發能力，其次為新北市瑞芳-平溪-雙溪區交界、桃園新竹交界、彰化斷層沿線有較強的觸發能力，惟須留意觸發強度將隨地震活動無時無刻改變，因此若欲用於評估數天後至數月地震活動，必須謹慎留意。

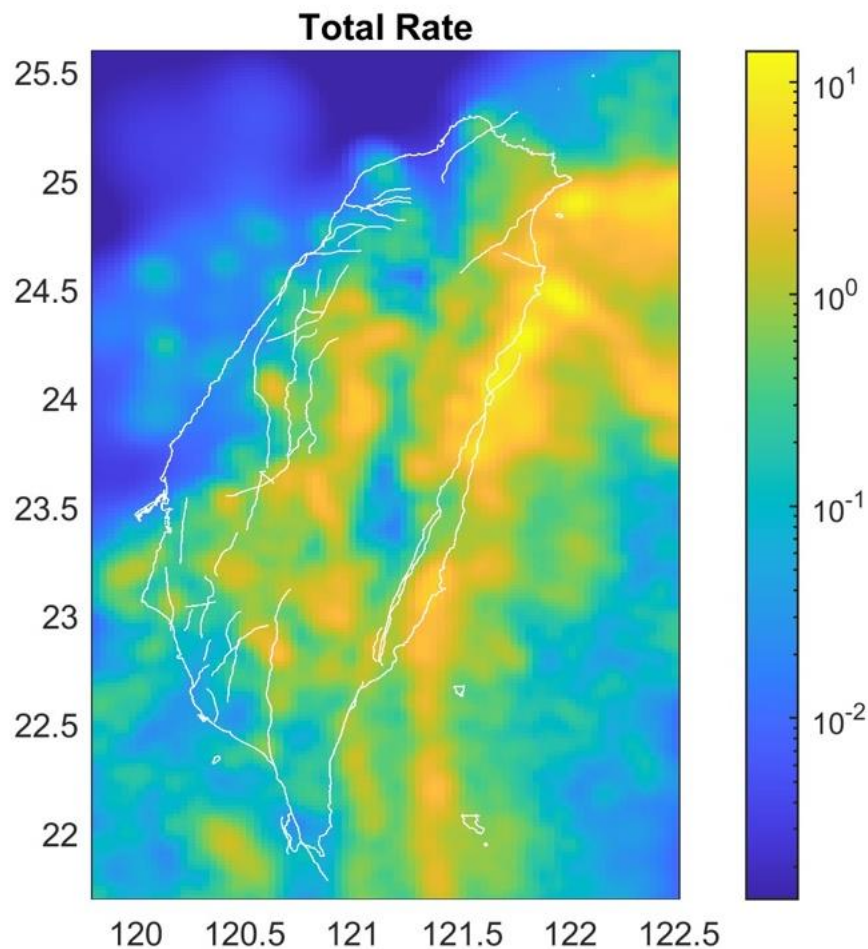


圖 15 累計至 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time) 之總體地震活動率

(色階單位為 events/day/deg²)

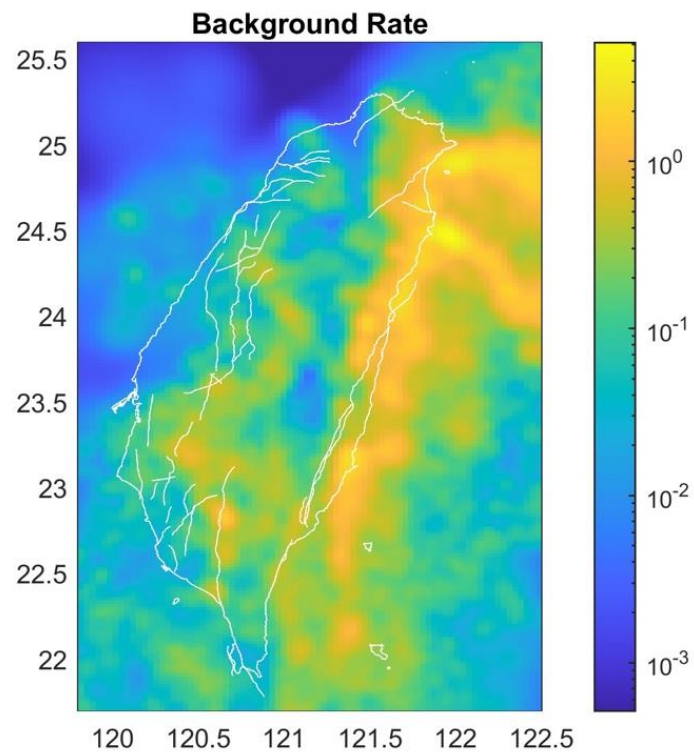


圖 16 累計至 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time)之背景地震活動率
(色階單位為 events/day/deg²)

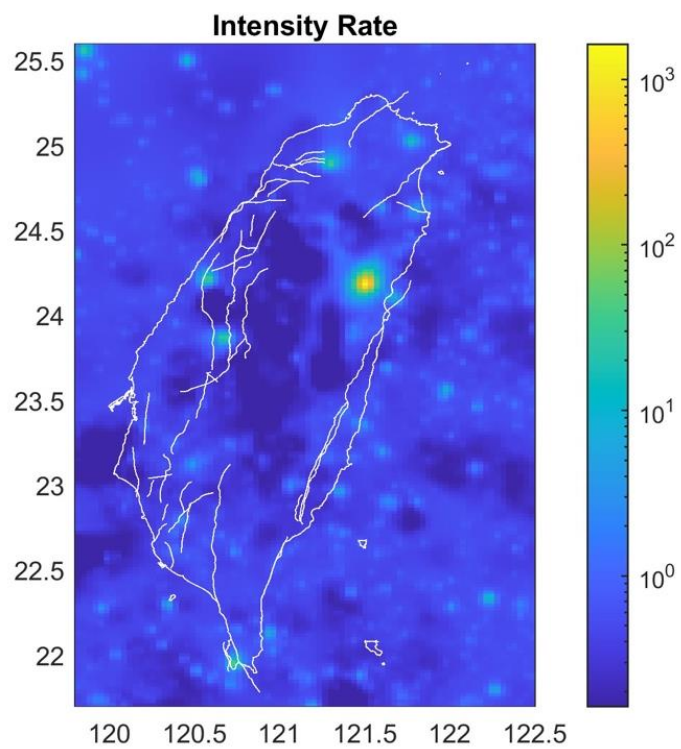


圖 17 累計至 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力
(色階單位為 events/day/deg²)

倘若將 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與後續地震活動比較(圖 18 至圖 22)，可發現 7 日內在花蓮區域發生數起地震事件，15 日內與 30 日內於桃園新竹交界亦發生數起地震事件，顯示以觸發能力判識叢集地震活動俱一定水準，惟須留意觸發能力對於背景地震活動之分析多有落差，因此在資訊判讀尚須留意，且特定時刻之觸發能力將隨時間變化，以較短之時間間隔不斷計算觸發能力預期將對預報叢集地震帶來較佳效果。以上僅為單一案例，而 2022 年 02 月起，每月 01 日之觸發能力與實際地震活動比較請見附件一。

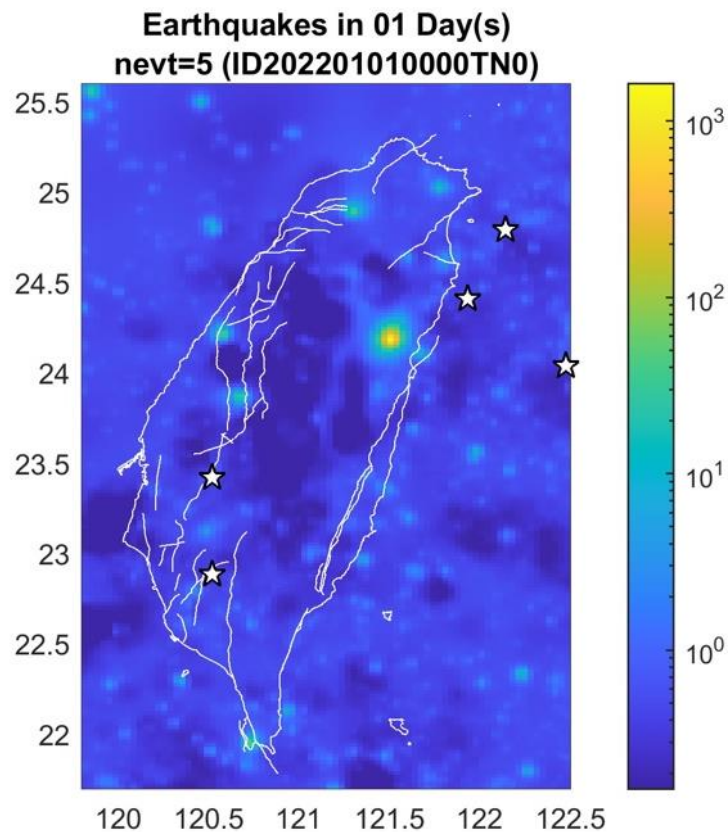


圖 18 累計至 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg^2 ；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)

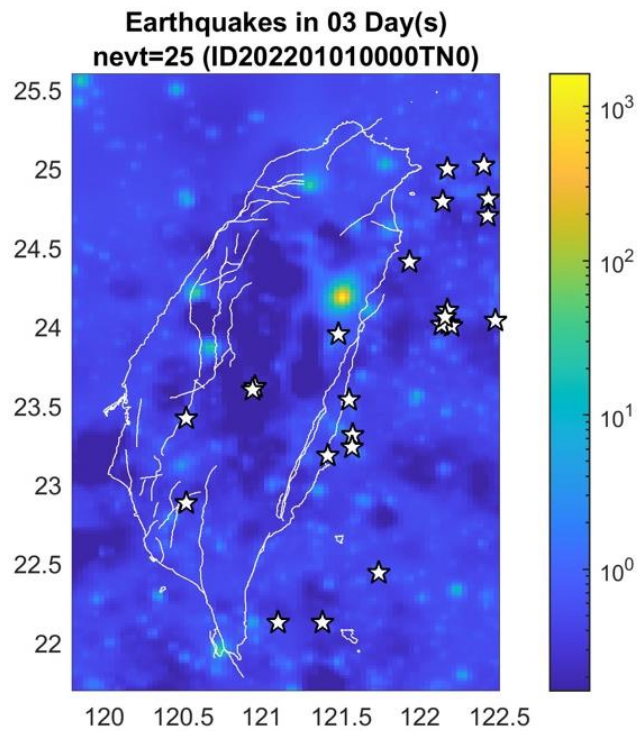


圖 19 累計至 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)

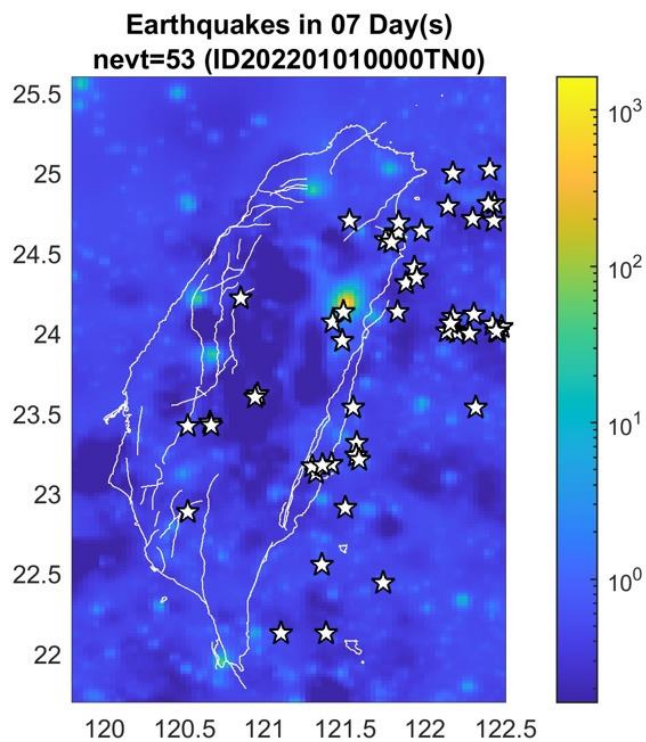


圖 20 累計至 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)

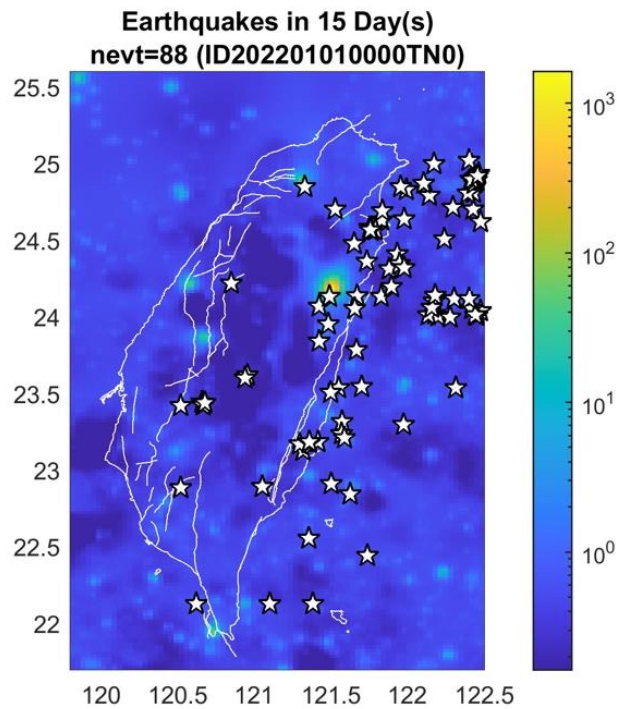


圖 21 累計至 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)

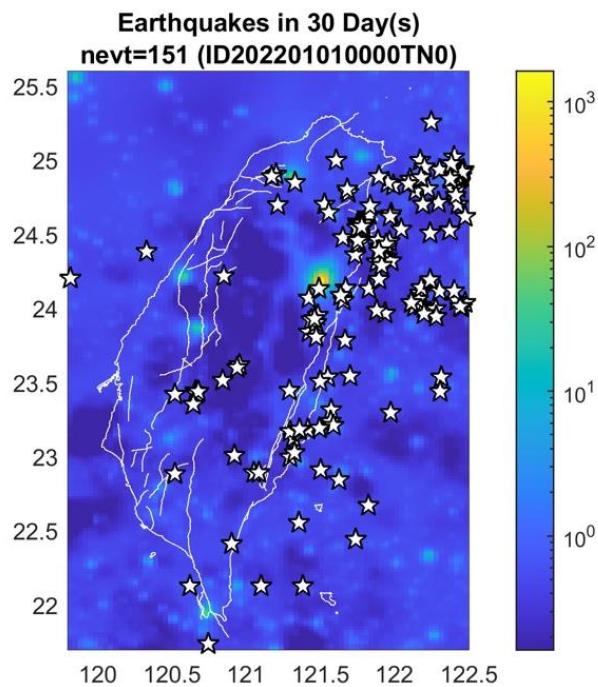


圖 22 累計至 2022/01/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

4. 2022 年臺東池上與關山地震案例研究

2022 年 09 月 17 日 13 時 41 分(UTC Time)發生芮氏規模 6.6 的關山地震(本章節稱其為前震)，以及 09 月 18 日 06 時 44 分(UTC Time)發生芮氏規模 6.8 的池上地震(本章節稱其為主震)，主因為歐亞板塊與菲律賓海板塊於臺灣東部縱谷斷層帶擠壓作用所引發。根據震央位置、震源深度、斷層面解與餘震分布推論，此次地震之發震斷層為一北北東走向、西傾約 70 至 80 度的逆移斷層，並致使玉里斷層和池上斷層沿線的地表破裂(經濟部地質調查及礦業管理中心，民 111)。

本研究以 3.1 節所述空間範圍，若於 GDMS 系統搜尋地震定位資訊，09 月 17 日 13 時 41 分至 09 月 25 日 0 時 0 分可搜尋到 332 筆規模 3 以上地震定位紀錄，其中大多數為此次臺東地震序列之前震、主震與餘震，其空間分布範圍多位於縱谷南段西側區域，成一狹長帶；而部分餘震則分布於縱谷東側；就時序而論，前震、主震、餘震有由南往北發震之趨勢，且有多數餘震集中於前震與主震之間區域。Lee et al. (2023)以有限斷層反演(finite-fault inversion)技術推估斷層面滑移量，其結果顯示大多數餘震分布位於推定斷層面、高滑移量地栓以外區域。

本研究運用 ETAS 技術，根據第三章所述 ETAS 參數擬合流程，回歸截至 2022 年 08 月 31 日為止之地震定位紀錄，取得更新後之 ETAS 參數如表 2 所示，隨後以該參數組進行發震潛勢區域判識。本研究分別計算前震發生前、發生後，以及主震發生前、發生後之觸發能力，觀察其變化，並與該時刻起一日內地震活動進行比較，其結果如圖 23-26 所示。

圖 23a 為前震發生前 11 分鐘之計算結果，臺東地區之觸發能力強度略較鄰近區域高，但仍低於高雄與屏東外海區域，因此臺東地區之觸發能力較難作為顯著指標，提示將發生規模 6.6 之強震；倘若套疊該觸發能力計算時刻(即 2022 年 09 月 17 日 13 時 30 分)，可見接下來一日內地震活動與觸發能力分布無明顯關聯性(圖 23b)。然而，於前震發生 19 分鐘後再次計算觸發能力(圖 24a)，臺東地區之觸發能力熱區明顯高於周圍區域數可達 10^4 倍，即規模 6.6 之前震其空間影響性甚巨，提示接下來將有地震發生在該熱區，然因本研究所使用之 ETAS 模式並未考量斷層面幾何、地震深度等震源資訊，即計算結果傾向將震源描述為點震源模型，因此該熱區分布樣態近似同心圓；若將觸發能力與一日內地震活動比較(圖 24b)，則可見多數餘震分布於前震周遭，部分餘震分布於前震北方區域形成一狹長帶。

圖 25a 為主震發生前 14 分鐘之觸發能力強度，由圖中可見前震區域之強度已略為下降，因此凸顯在臺灣東北角外海、西南部與外海區域有稍高之觸發能力，前震區域之強度仍較背景高 10^3 倍，提示前震區域仍有高潛勢將發生地震；若與 1 日內地震活動進行比較(圖 25b)，仍可見到餘震大多分布於前震區域，而將發生之主震位於熱區之北邊。當主震發生後 16 分鐘後，再次計算觸發能力強度(圖 26a)，則可發現其熱區範圍因受主震在前震北邊之影響，熱區分布範圍形成沿縱谷分布之長條形；往後一日內之餘震分布亦呈現相同樣態分布。

以上結果顯示，若累計地震資料持續更新、並納入本研究所使用之二維 ETAS 模式計算，可顯著輔助判斷中規模($M_L < 6$)以下餘震分布行為，即推估近期地震活動以及各地震事件之時空影響範圍；對於中大規模($M_L \geq 6$)地震活動，ETAS 模式亦可協助判斷，然而以斷層動力學角度而言，受限對於中大規模地震破裂過程較為複雜，

破裂面選取、破裂方向性、地栓分布、破裂尺度等與震源有關項，以及區域應力擾動與再調整在同震期間之變化，將影響地震活動預報成效。對於上述限制，Guo et al. (2015a)、Guo et al. (2018)與 Asayesh et al. (2023)提出了考量震源深度之三維 ETAS 模式；Guo et al. (2015b)與 Guo et al. (2019)則提出了考量斷層面幾何之 ETAS 模式，上述模式皆可基於現有二維 ETAS 模式，精進解析地震活動。

針對 2022 年 09 月之臺東地震序列，本研究自 2022 年 09 月 17 日 00 時 00 分計算觸發強度截至 2022 年 09 月 25 日 00 時 00 分，將成果以每小時為間隔置於附錄二，可見截至計算截止時刻，臺東區域仍有較其他區域有較強觸發能力(圖附 53)。

表 2 2022 年 09 月之 ETAS 參數回歸

	μ	A (counts/day)	C (day)	α	p	D (deg ²)	q	γ
輸出參數	0.5737	1.4479	0.0011	1.1297	1.0157	0.00067	2.2870	0.3494

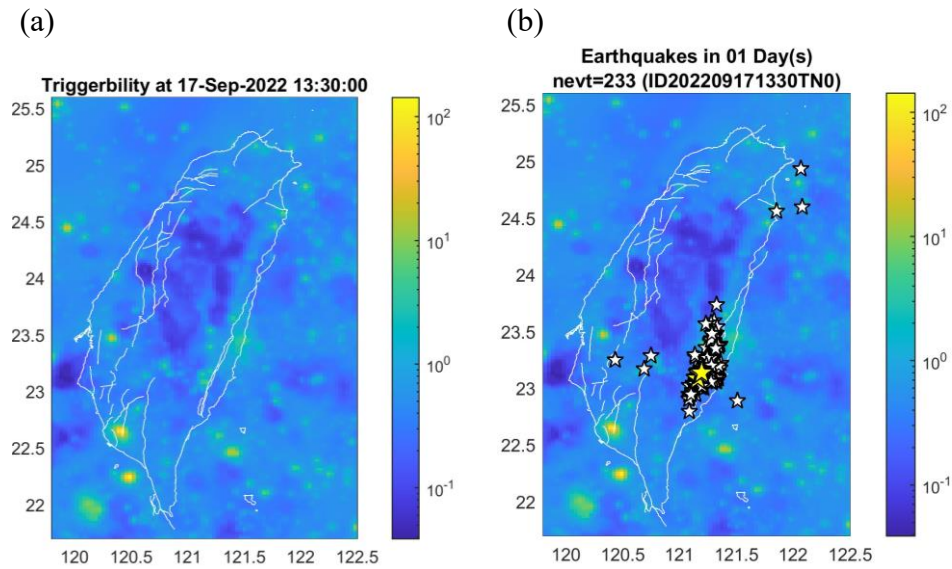


圖 23 關山地震震前全島地震觸發能力分布

(a)觸發能力分布與(b)觸發能力分布套疊 1 日內地震活動。圖中色階表示觸發能力，單位為 events/day/deg^2 ；觀測地震方面，則選取計算產出觸發能力之時刻起計 1 日內之實際觀測地震，白色與黃色星號分別表示規模 3 以上與規模 6 以上觀測地震事件。

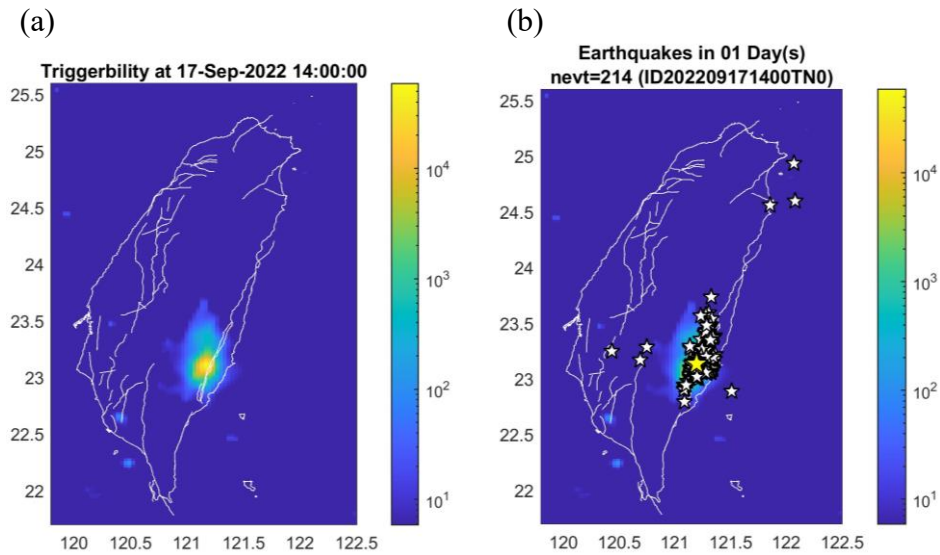


圖 24 關山地震震後全島地震觸發能力分布

圖說同圖 23。

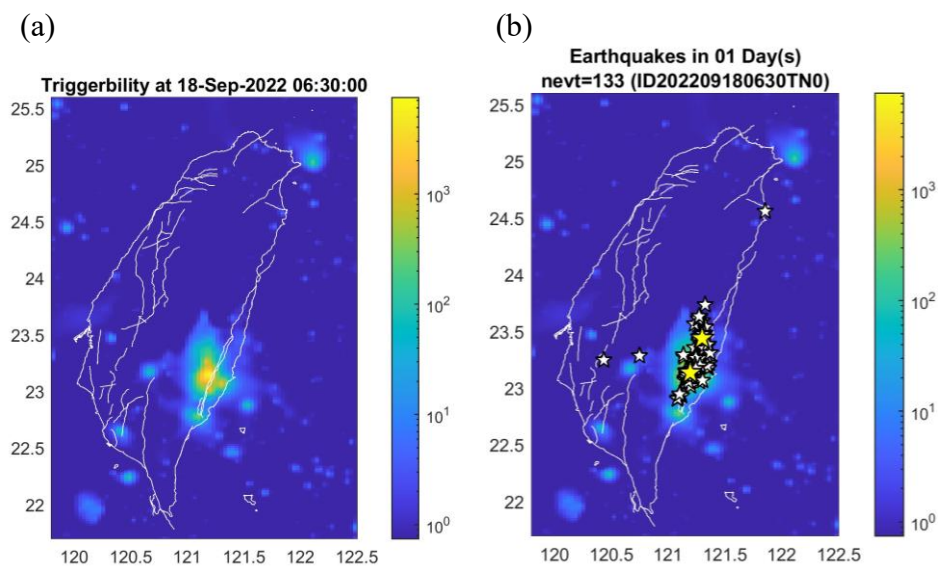


圖 25 池上地震震前全島地震觸發能力分布

圖說同圖 23。

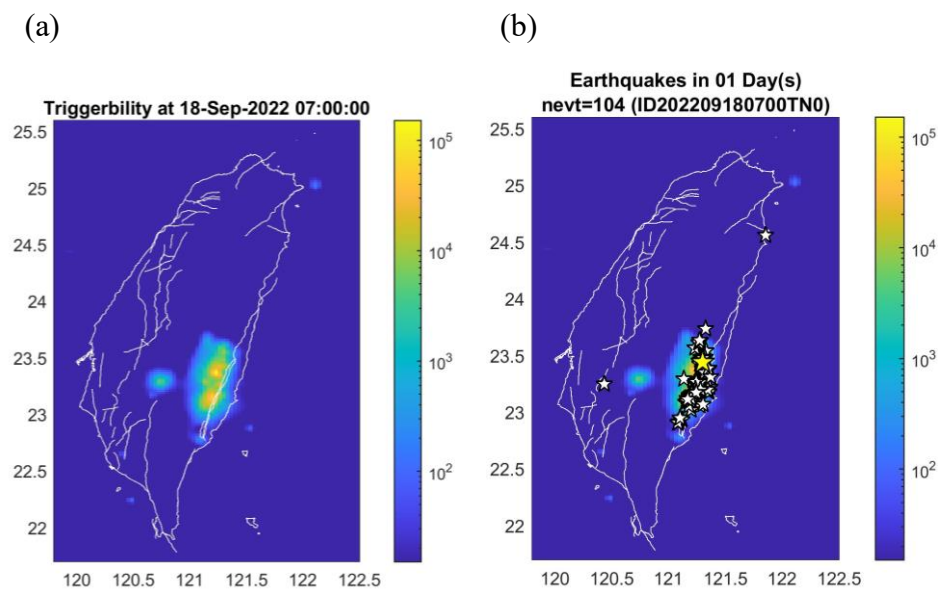


圖 26 池上地震震後全島地震觸發能力分布

圖說同圖 23。

5. 成果總結

本研究於本期計畫已完成：(1) 地震目錄蒐集與彙總；(2) 建構 ETAS 計算程序；(3) 執行 1994 年至 2021 年之地震目錄分析；(4) 以 ETAS 模型參數推估 2022 年 01 至 09 月地震觸發能力，並與實際觀測成果比較；(5) 針對 2022 年 09 月發生之臺東地震序列進行細緻化計算。

現階段結果顯示基於傳染型餘震序列模型參數之隨機除叢法能有效篩濾地震目錄中之背景與叢集地震事件，分析地震事件間之機率與從屬關係，取得臺灣區域地震活動特徵，顯示隨機除叢法對地震目錄進行分析具有相當成效。此外，根據總體地震發生率、背景地震發生率與觸發能力計算結果，顯示觸發能力對叢集地震活動行為較為敏感，初步測試顯示觸發能力可對應實際地震活動分布，若技術發展與資料處理流程足夠成熟且穩定，或有潛力可應用於地震預報工作。作為嘗試，本研究以 2022 年 09 月池上、關山兩起地震事件與其餘震作為 ETAS 模式驗證，分析 09 月 17 日至 09 月 25 日期間地震觸發能力強度變化，發現前震和主震前後，觸發能力有顯著變化。顯示前震發生後，臺東地區的觸發能力即增強 10^4 倍，而主震發生後之計算顯示熱區範圍沿著縱谷形成長條形分布，與後續觀測餘震相符。本研究計算自 09 月 17 日至 25 日之全島地震觸發能力，發現截至 25 日 00 時，臺東區域依然有相對較強之觸發能力，暗示該區域仍有較高的地震發生潛勢。

本研究採用之二維 ETAS 模型在預測中大規模地震 ($M_L \geq 6$) 時有所局限，因該模式未考慮斷層面幾何、地震深度等因素。因此，部分研究提出精進方法，例如考慮震源深度變化之三維 ETAS 模式，以及考量斷層破裂面之 ETAS 模式，皆可提高對地震活動的解析度。以上精進方法可視為後續本研究可持續執行與強化地震預報能力之目標與策略。

6. 參考文獻

- Asayesh, B. M., S. Hainzl, and G. Zöller (2023). Depth-Dependent Aftershock Trigger Potential Revealed by 3D-ETAS Modeling, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 128(6), doi: 10.1029/2023jb026377
- Cheng C.-T., P.-S. Hsieh, P.-S. Lin, Y.-T. Yen, C.-H. Chan (2015). Probability seismic hazard mapping of Taiwan, *Encycl. Earthq. Eng.*, 10, 1-25, doi: 10.1007/978-3-642-36197-5_100-1
- Guo, Y. C., J. C. Zhuang, and S. Y. Zhou (2015a). A hypocentral version of the space-time ETAS model, *Geophys. J. Intl.*, 203(1), 366–372, doi: 10.1093/gji/ggv319
- Guo, Y. C., J. C. Zhuang, and S. Y. Zhou (2015b). An improved space-time ETAS model for inverting the rupture geometry from seismicity triggering, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120(5), 3309–3323, doi: 10.1002/2015jb011979
- Guo, Y. C., J. C. Zhuang, and N. Hirata (2018). Modelling and forecasting three-dimensional-hypocentre seismicity in the Kanto region, *Geophys. J. Intl.*, 214(1), 520–530, doi: 10.1093/gji/ggy154
- Guo, Y. C., J. C. Zhuang, and Y. Ogata (2019). Modeling and forecasting aftershocks can be improved by incorporating rupture geometry in the ETAS model, *Geophys. Res. Lett.*, 46(22), 12881–12889, doi: 10.1029/2019gl084775
- Gutenberg, B., and C. F. Richter (1944), Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 34, 185–188.
- Lee, S., T. Liu, and T. Lin (2023). The role of the west-dipping collision boundary fault in the Taiwan 2022 Chihshang earthquake sequence. *Sci. Rep.*, 13(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30361-0>
- Ogata, Y. (1998), Space-time point-process models for earthquake occurrence, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 50(2), 379-402.
- Ogata, Y. (1988), Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J. Am. Stat. Assoc.*, 83, 9–27.
- Omi, T., Y. Ogata, Y. Hirata, and K. Aihara (2013), Forecasting large aftershocks within one day after the main shock, *Sci. Rep.*, 3, 2218.
- Omori, F. (1894), On the aftershocks of earthquake, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 7, 111–200.
- Utsu, T. (1961), A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys. Mag.*, 30, 521–605.
- Utsu, T., Y. Ogata, and R. S. Matsu'ura (1995), The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *J. Phys. Earth*, 43, 1–33.
- Zhuang, J., Y. Ogata, and D. Vere-Jones (2004), Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction, *J. Geophys. Res.*, 109, B5, B05301, doi:10.1029/2003JB002879

Zhuang, J., Y. Ogata (2006), Properties of the probability distribution associated with the largest event in an earthquake and their implications to foreshocks, *Physical Review E. Stat. Nonlin. Soft. Matter. Phys.*, 73(4), 046134, doi: 10.1103/PhysRevE.73.046134

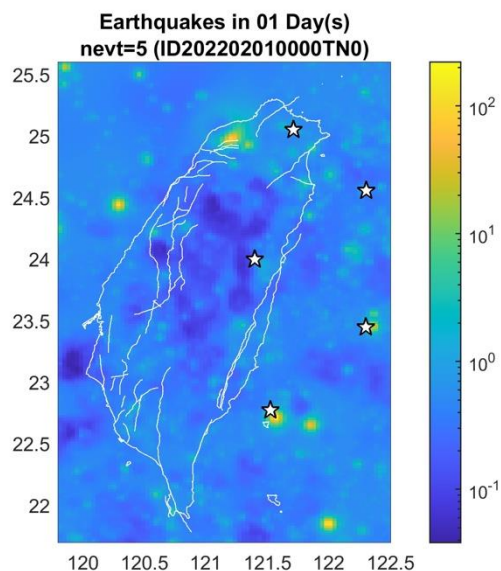
Zhuang, J., Y. Ogata, and D. Vere-Jones (2002), Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences, *J. Am. Stat. Assoc.*, 97, 369-380.

經濟部地質調查及礦業管理中心(民 111)。20220917 關山地震、0918 池上地震地質調查報告，78 頁，臺北，臺灣。

7. 附錄一

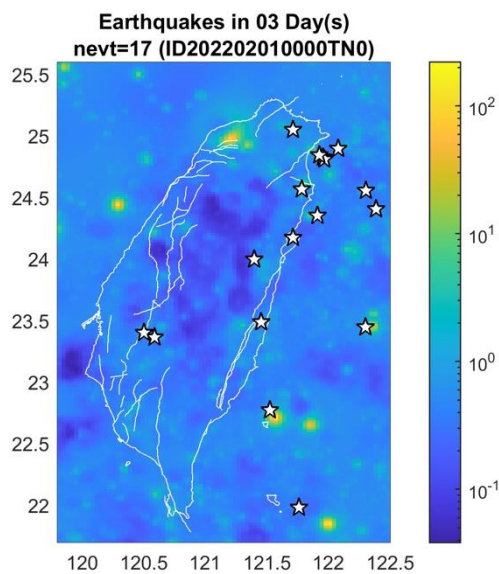
2022 年 02 至 09 月每月 01 日之觸發能力與觀測地震事件比較

觸發能力基準日：2022/02/01 00:00:00 (UTC Time)



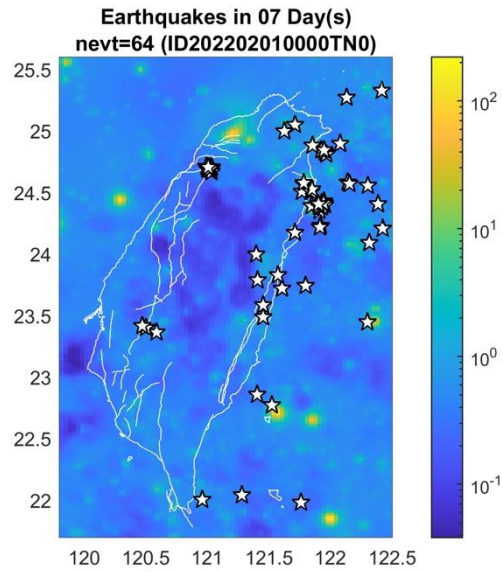
圖附 1 累計至 2022/02/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較

(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)

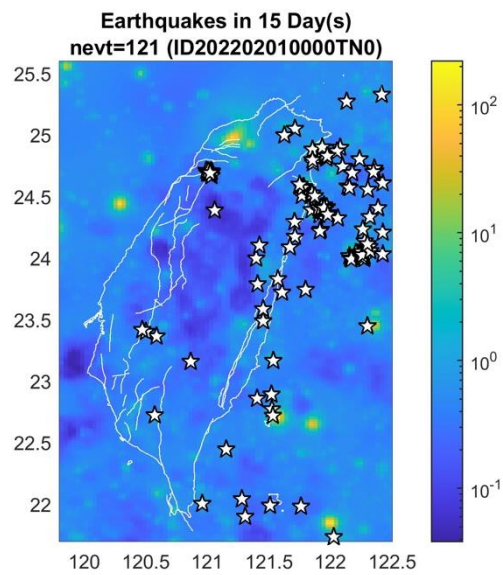


圖附 2 累計至 2022/02/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較

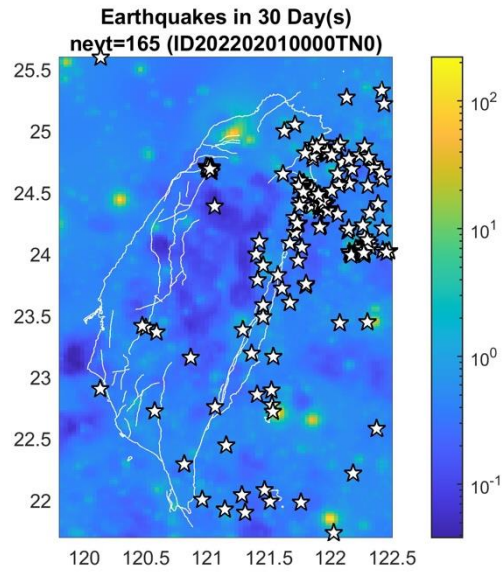
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)



圖附 3 累計至 2022/02/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)

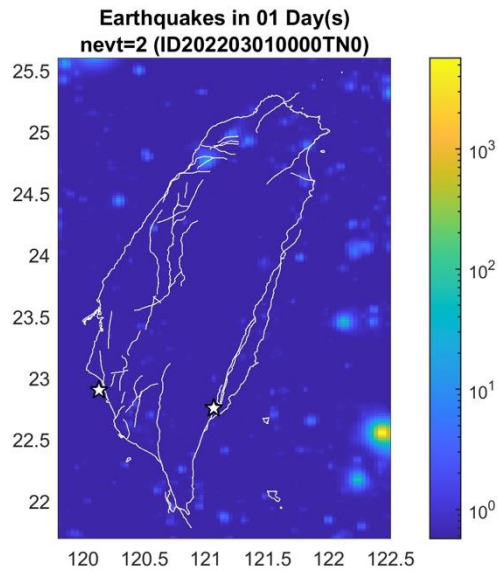


圖附 4 累計至 2022/02/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)

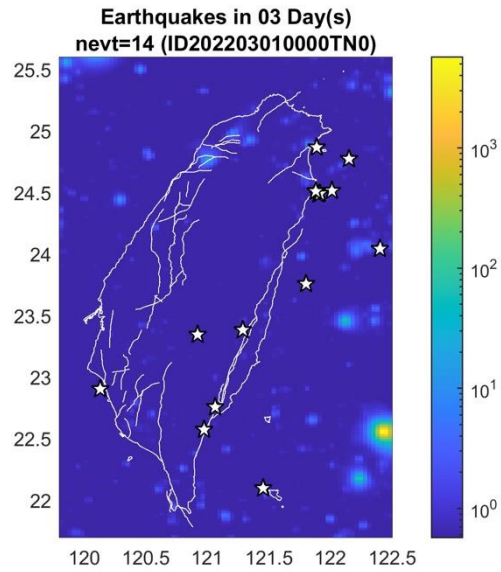


圖附 5 累計至 2022/02/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

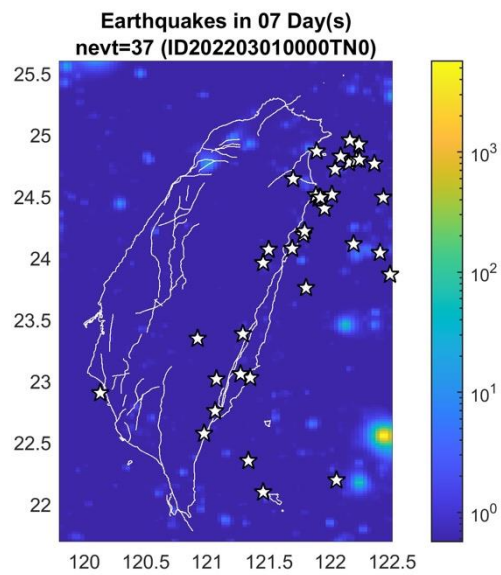
觸發能力基準日：2022/03/01 00:00:00 (UTC Time)



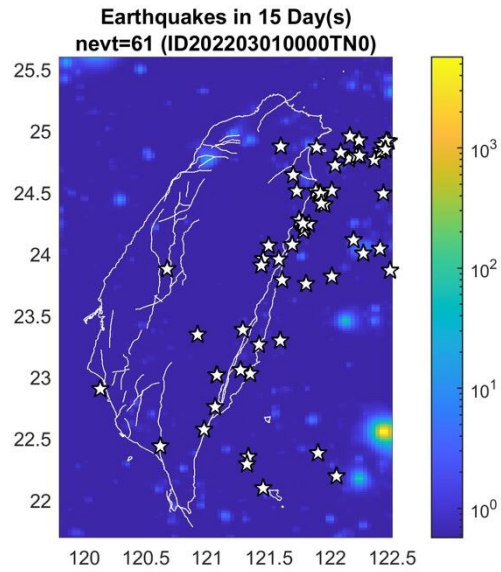
圖附 6 累計至 2022/03/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)



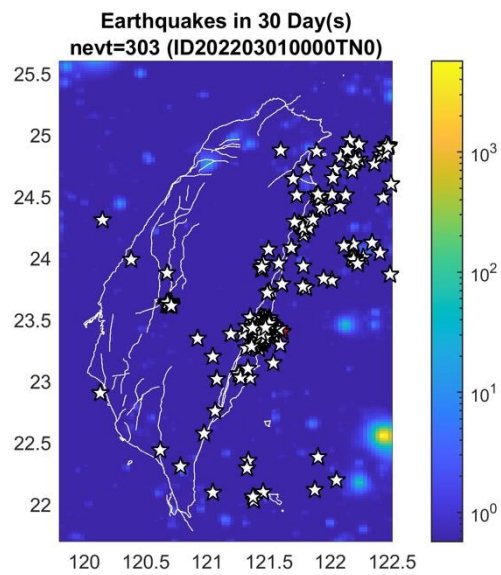
圖附 7 累計至 2022/03/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)



圖附 8 累計至 2022/03/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)

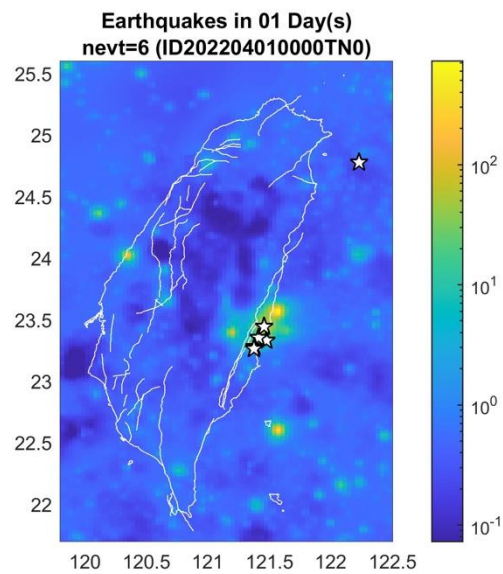


圖附 9 累計至 2022/03/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)



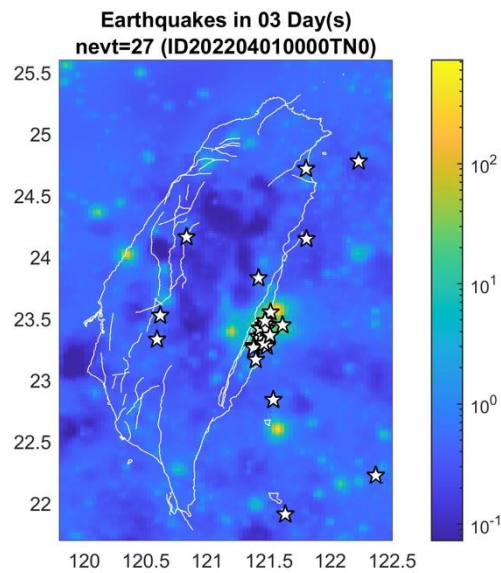
圖附 10 累計至 2022/03/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

觸發能力基準日：2022/04/01 00:00:00 (UTC Time)



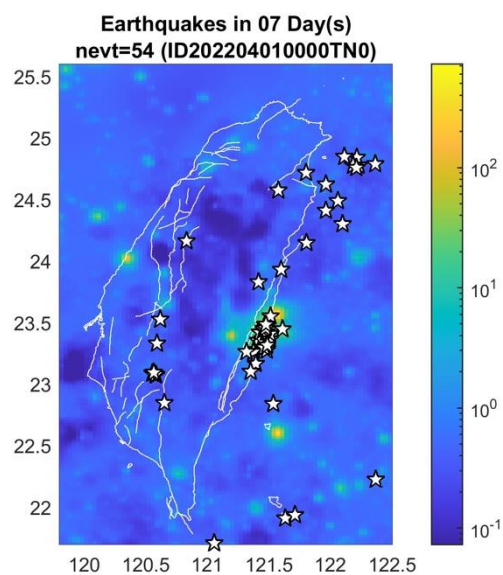
圖附 11 累計至 2022/04/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較

(觸發能力單位為 events/day/deg^2 ；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)

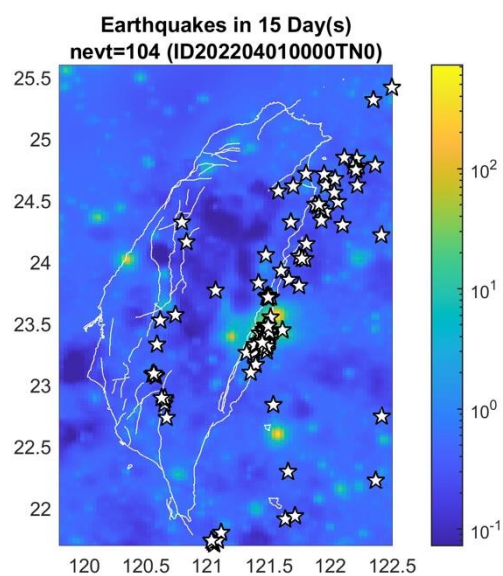


圖附 12 累計至 2022/04/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較

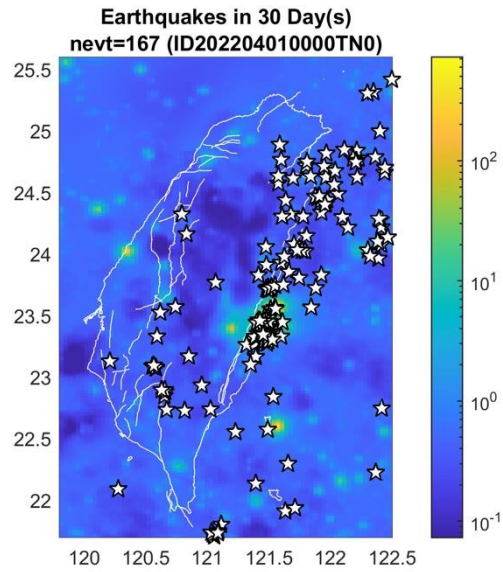
(觸發能力單位為 events/day/deg^2 ；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)



圖附 13 累計至 2022/04/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)

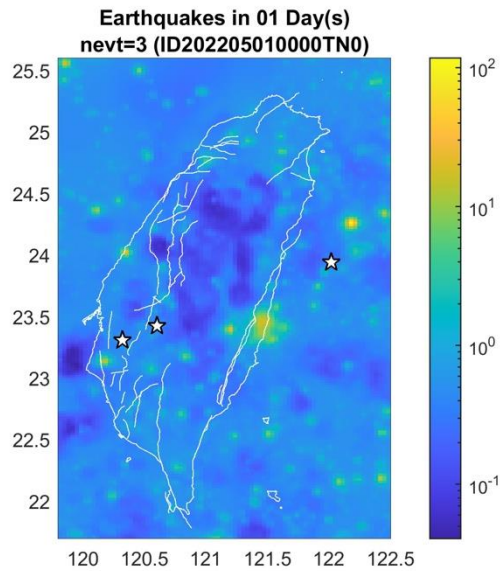


圖附 14 累計至 2022/04/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)

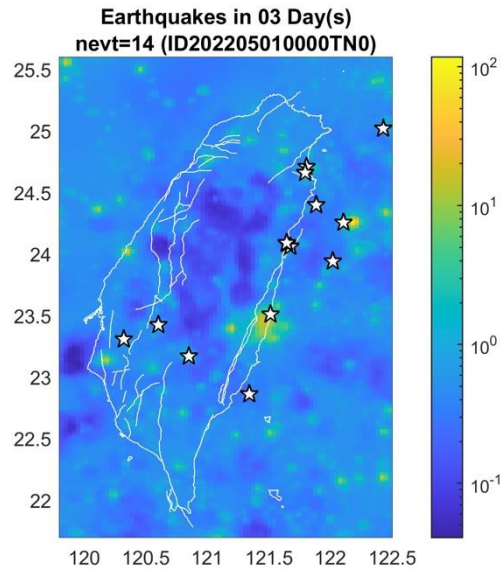


圖附 15 累計至 2022/04/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

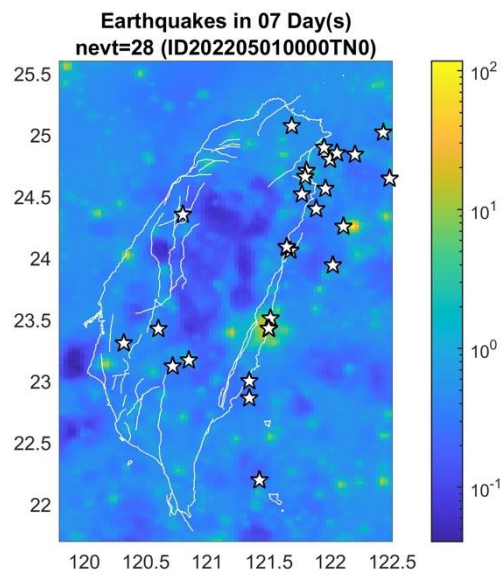
觸發能力基準日：2022/05/01 00:00:00 (UTC Time)



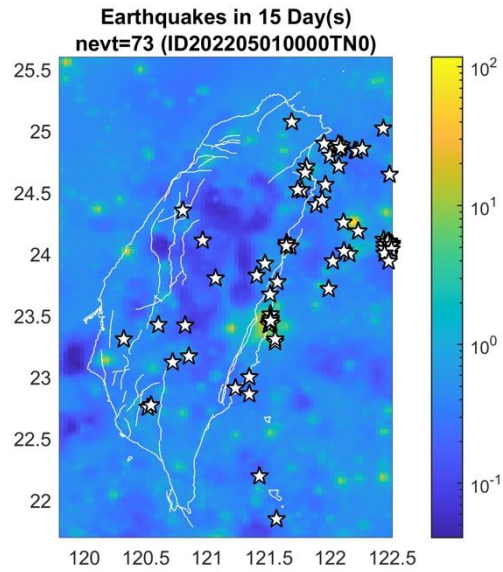
圖附 16 累計至 2022/05/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)



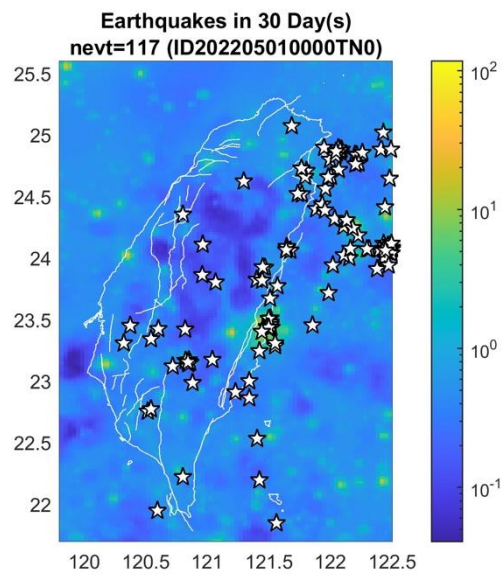
圖附 17 累計至 2022/05/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)



圖附 18 累計至 2022/05/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)

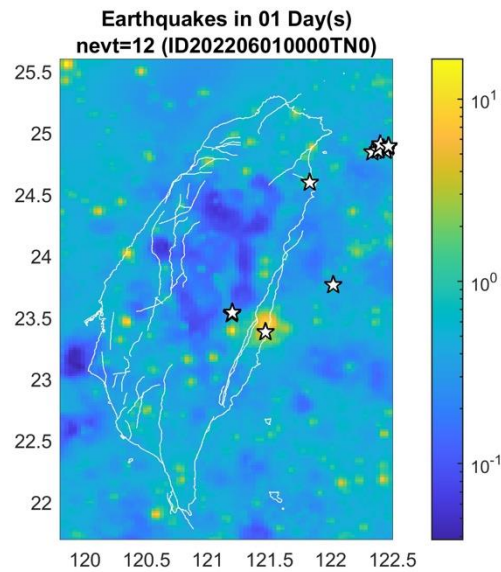


圖附 19 累計至 2022/05/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)

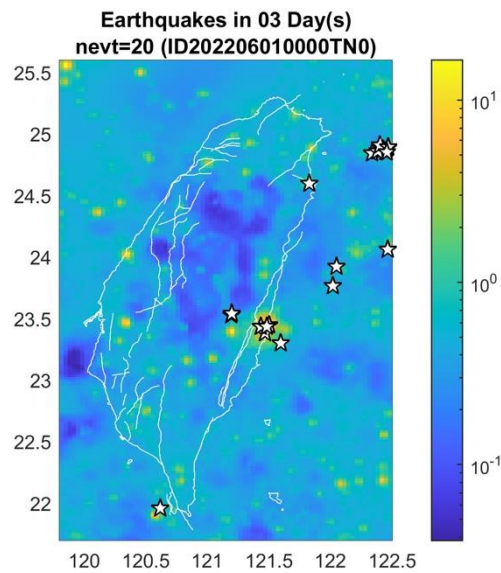


圖附 20 累計至 2022/05/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

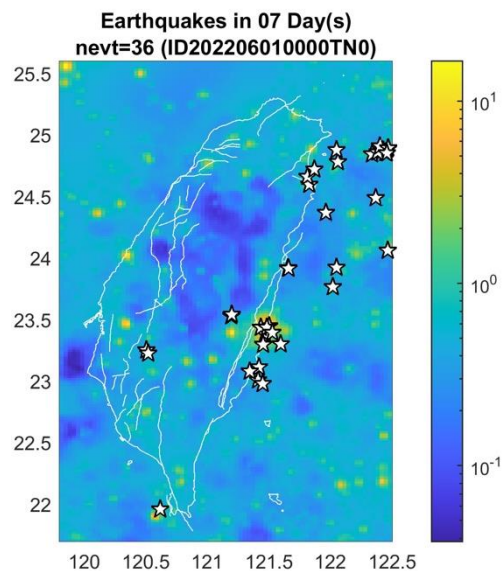
觸發能力基準日：2022/06/01 00:00:00 (UTC Time)



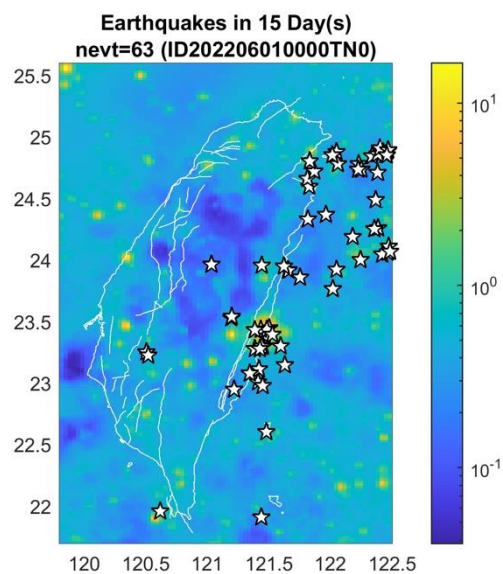
圖附 21 累計至 2022/06/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)



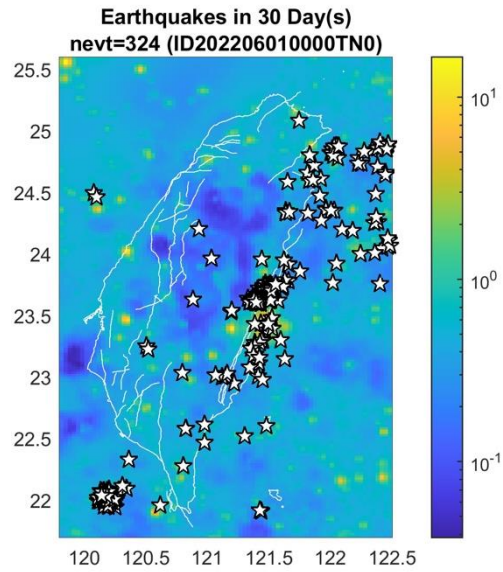
圖附 22 累計至 2022/06/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)



圖附 23 累計至 2022/06/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)

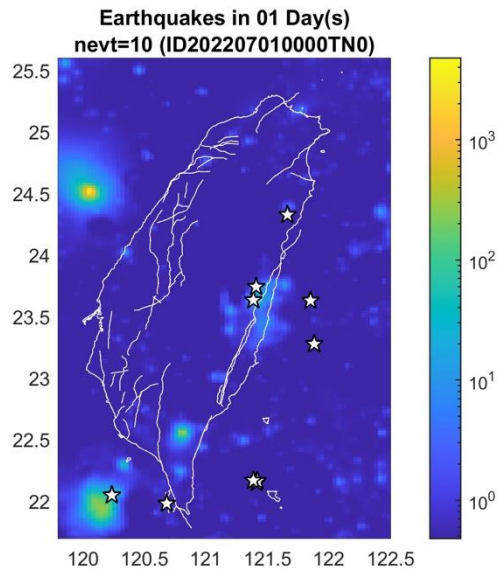


圖附 24 累計至 2022/06/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)

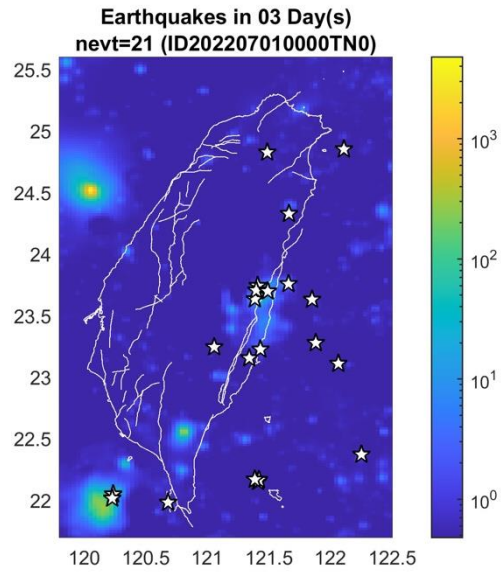


圖附 25 累計至 2022/06/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

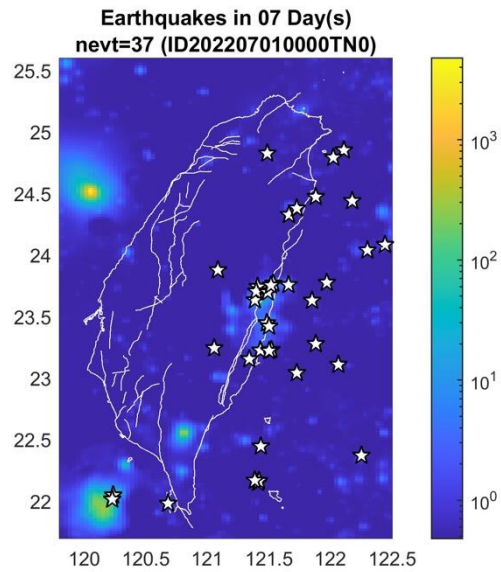
觸發能力基準日：2022/07/01 00:00:00 (UTC Time)



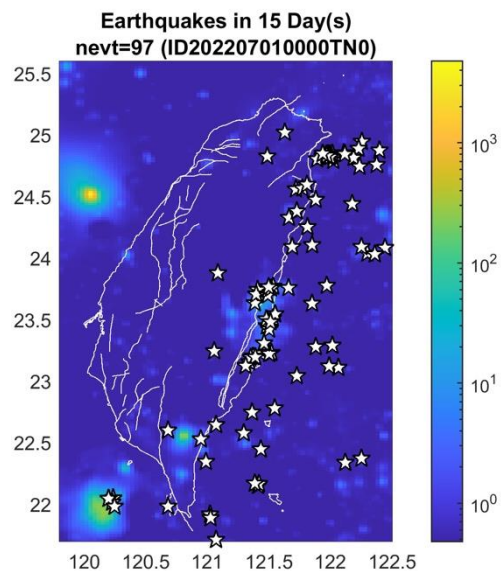
圖附 26 累計至 2022/07/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)



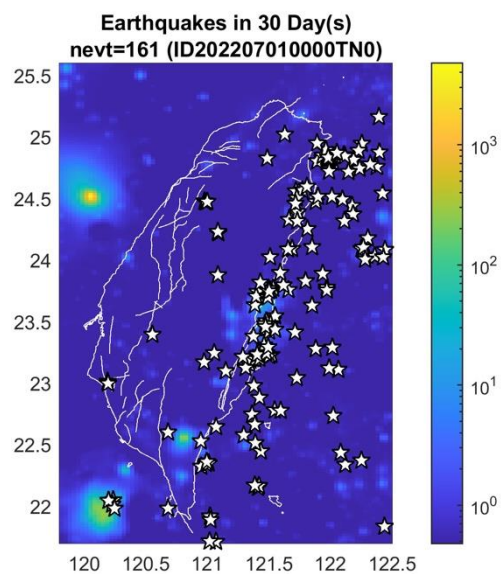
圖附 27 累計至 2022/07/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)



圖附 28 累計至 2022/07/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)

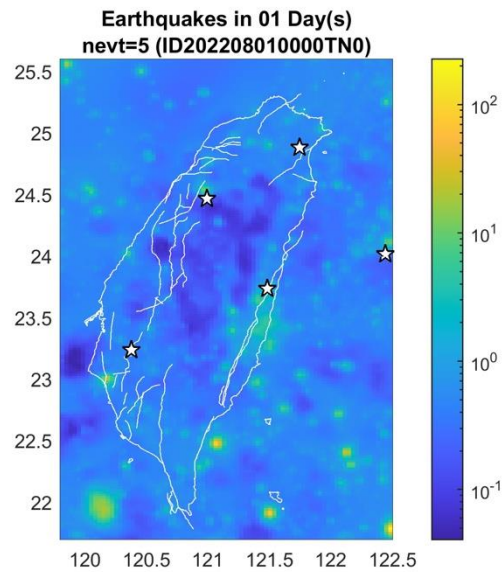


圖附 29 累計至 2022/07/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)



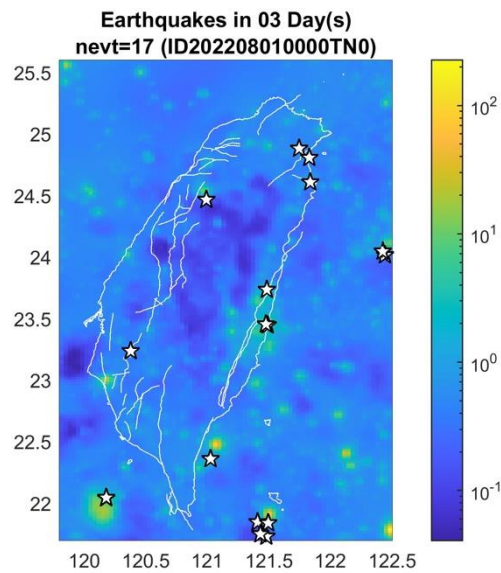
圖附 30 累計至 2022/07/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

觸發能力基準日：2022/08/01 00:00:00 (UTC Time)



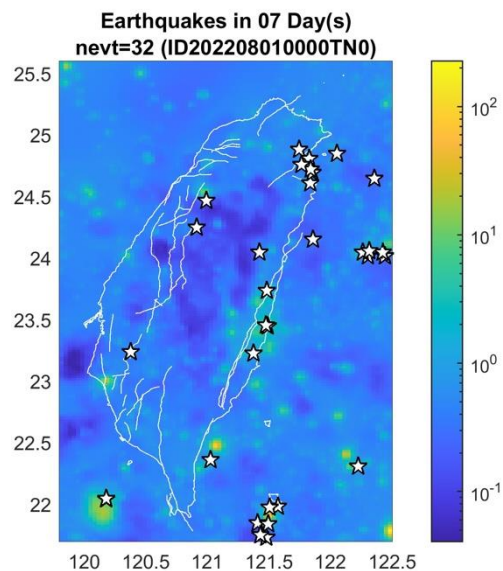
圖附 31 累計至 2022/08/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較

(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)

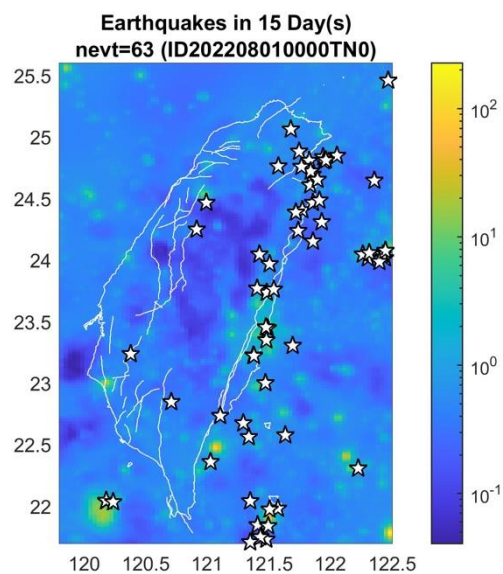


圖附 32 累計至 2022/08/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較

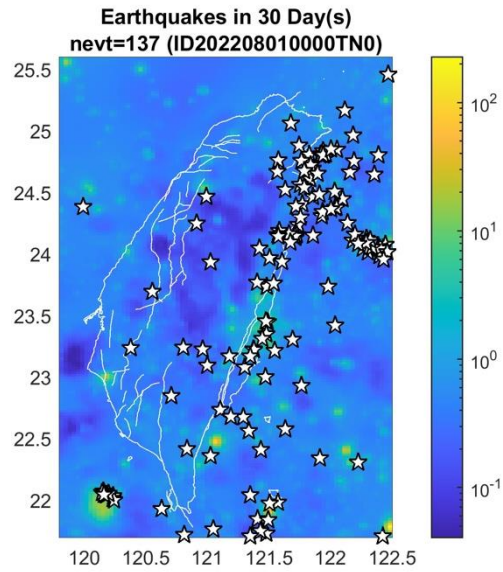
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)



圖附 33 累計至 2022/08/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)

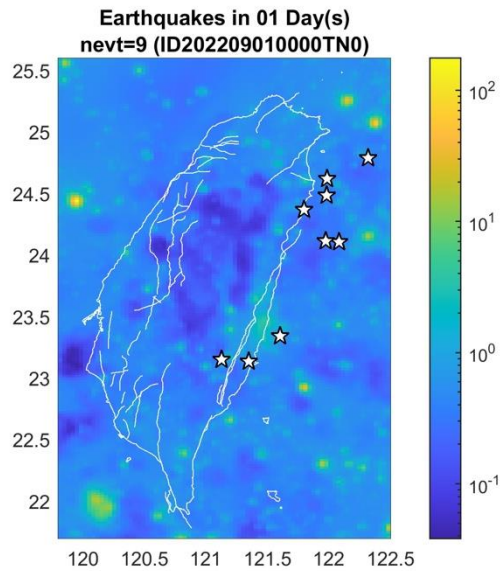


圖附 34 累計至 2022/08/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)

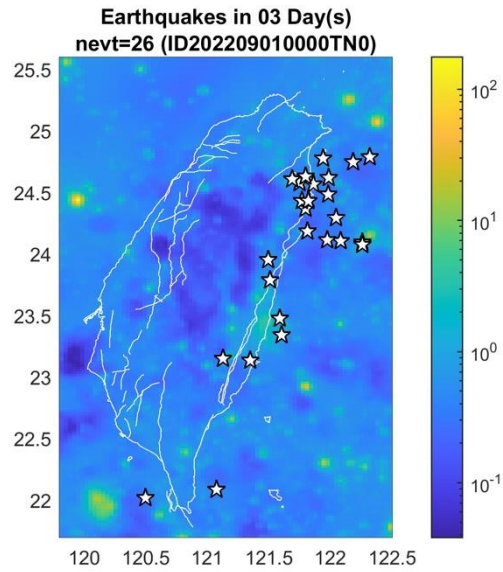


圖附 35 累計至 2022/08/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

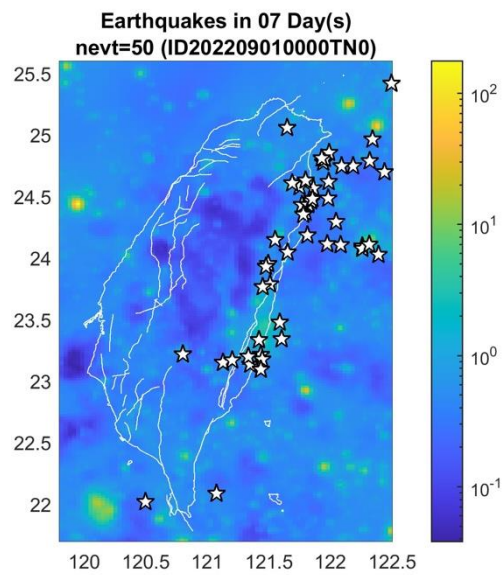
觸發能力基準日：2022/09/01 00:00:00 (UTC Time)



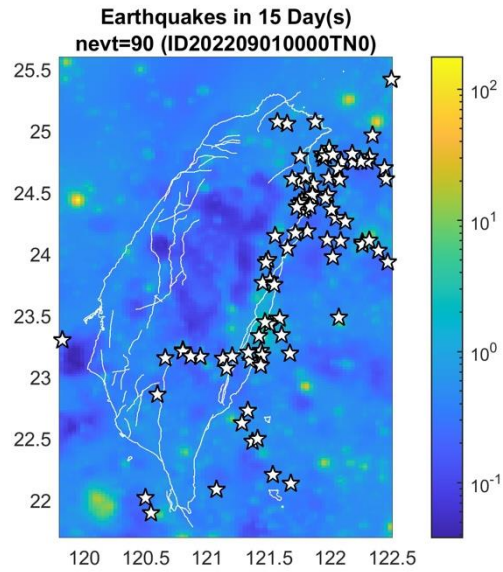
圖附 36 累計至 2022/09/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 1 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 1 日內實際觀測地震事件)



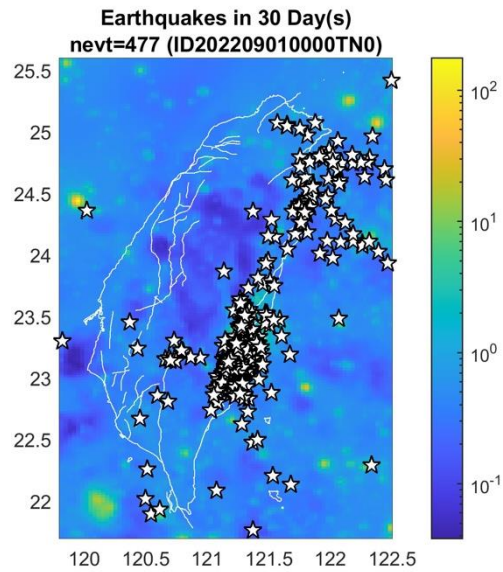
圖附 37 累計至 2022/09/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 3 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 3 日內實際觀測地震事件)



圖附 38 累計至 2022/09/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 7 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 7 日內實際觀測地震事件)



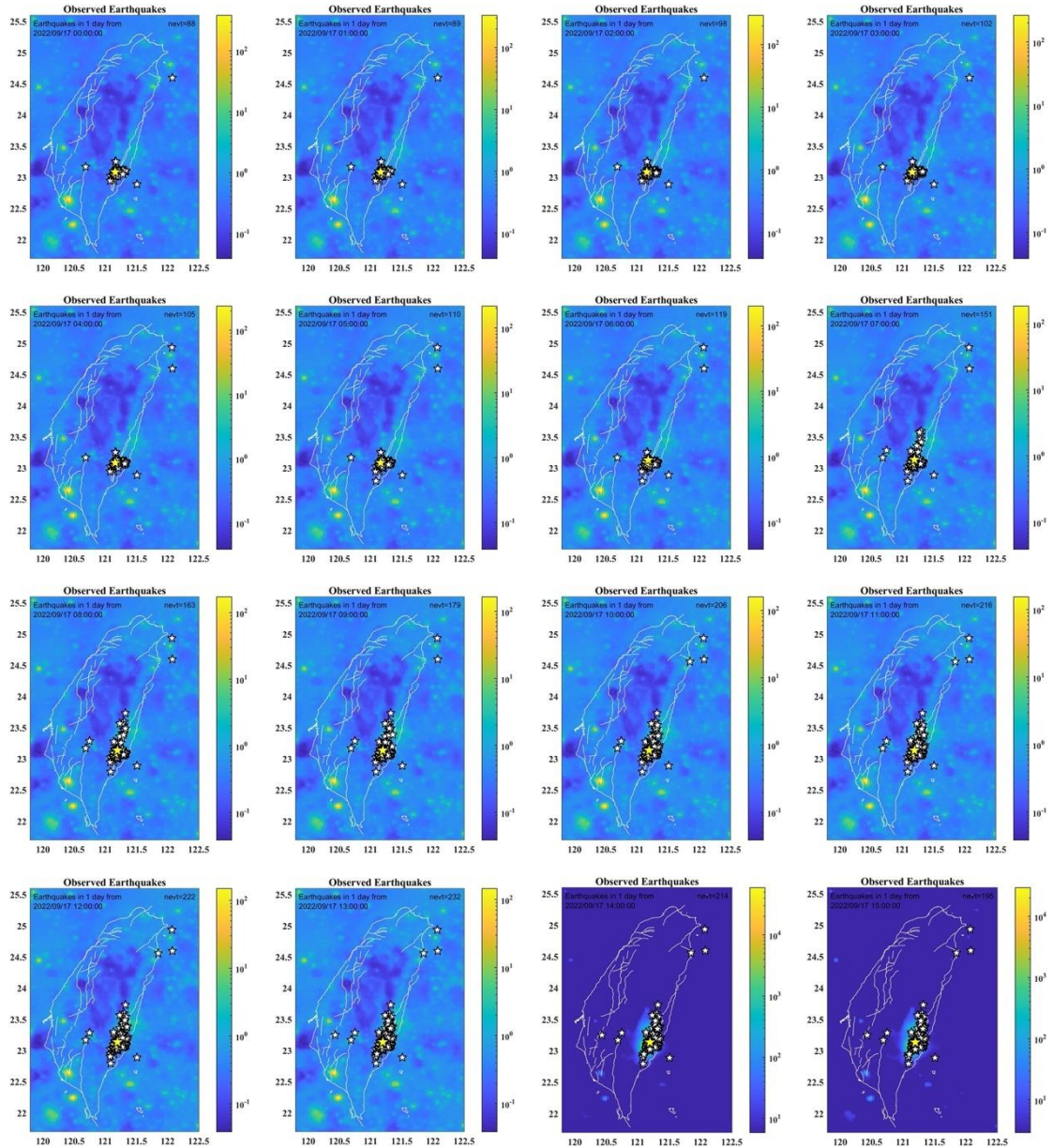
圖附 39 累計至 2022/09/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 15 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 15 日內實際觀測地震事件)



圖附 40 累計至 2022/09/01 00:00:00 (UTC Time)之觸發能力與 30 日內地震活動比較
(觸發能力單位為 events/day/deg²；白色星號為 30 日內實際觀測地震事件)

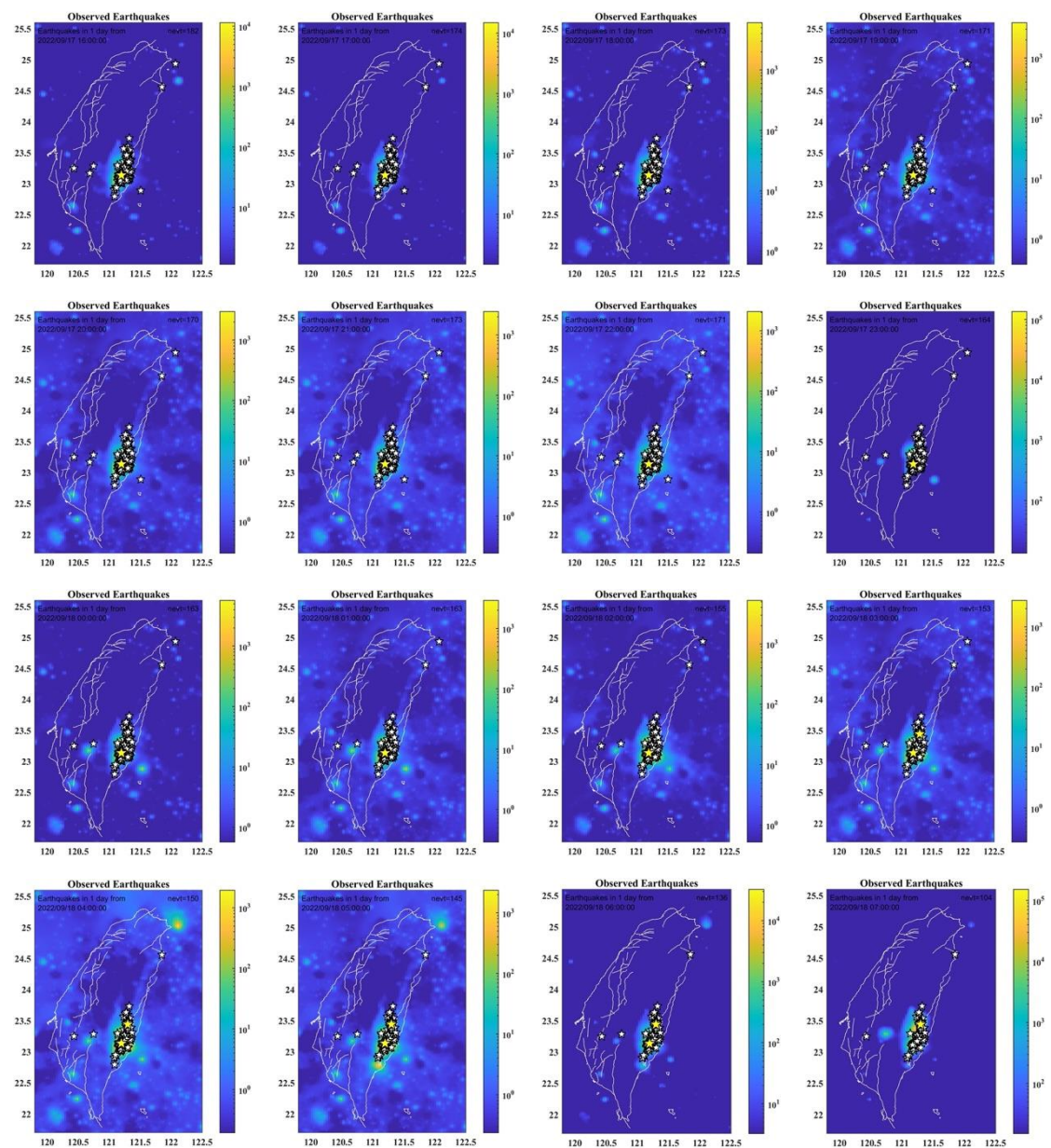
8. 附錄二

2022 年 09 月 17 日至 25 日之地震觸發能力與觀測比較



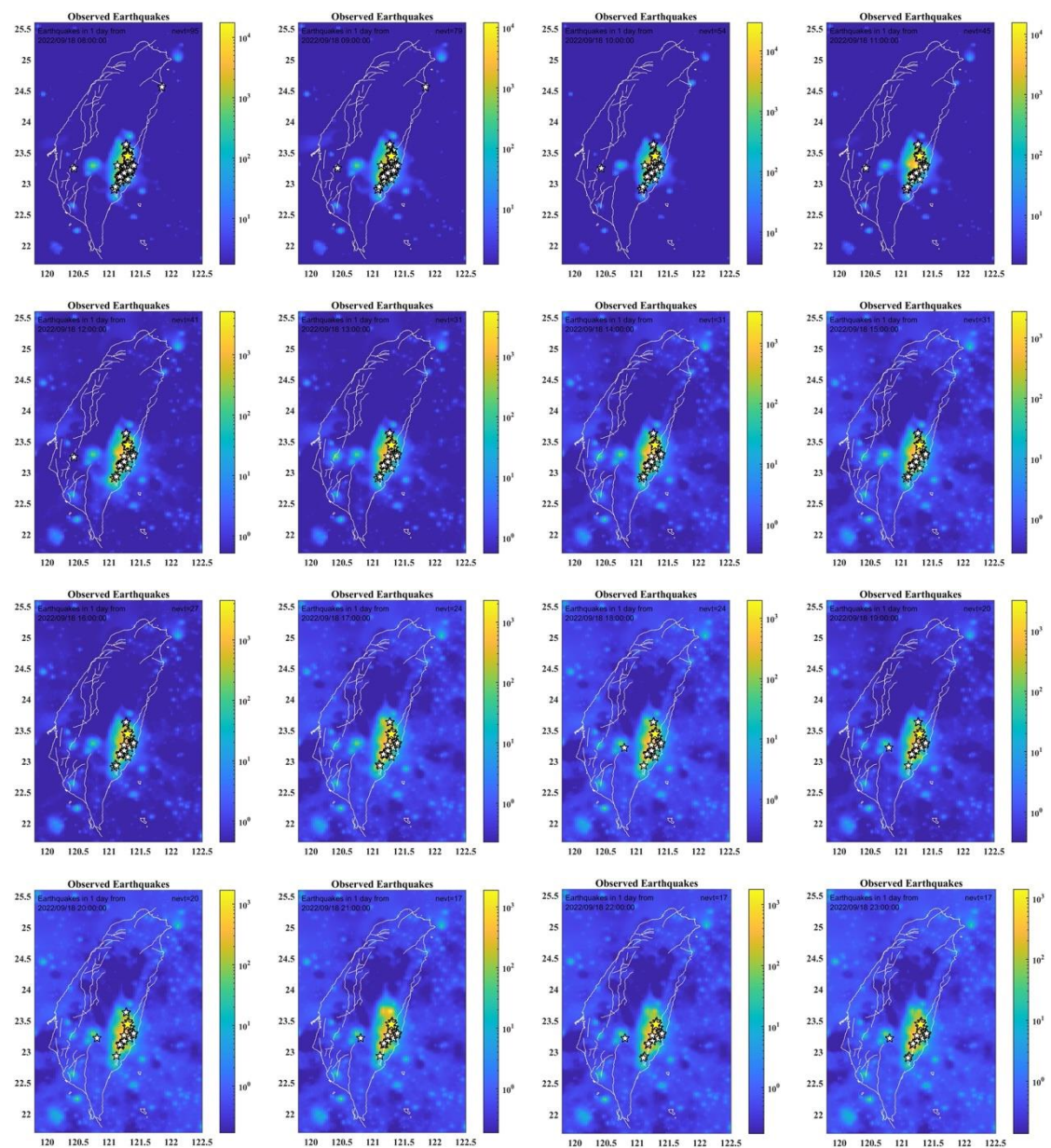
圖附 41 2022 年 09 月 17 日 00 時至 09 月 17 日 15 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖中色階表示觸發能力，單位為 events/day/deg^2 ，以每小時為間隔呈現其強度隨時間變化；觀測地震方面，則選取計算產出觸發能力之時刻起計 1 日內之實際觀測地震，白色與黃色星號分別表示規模 3 以上與規模 6 以上觀測地震事件。



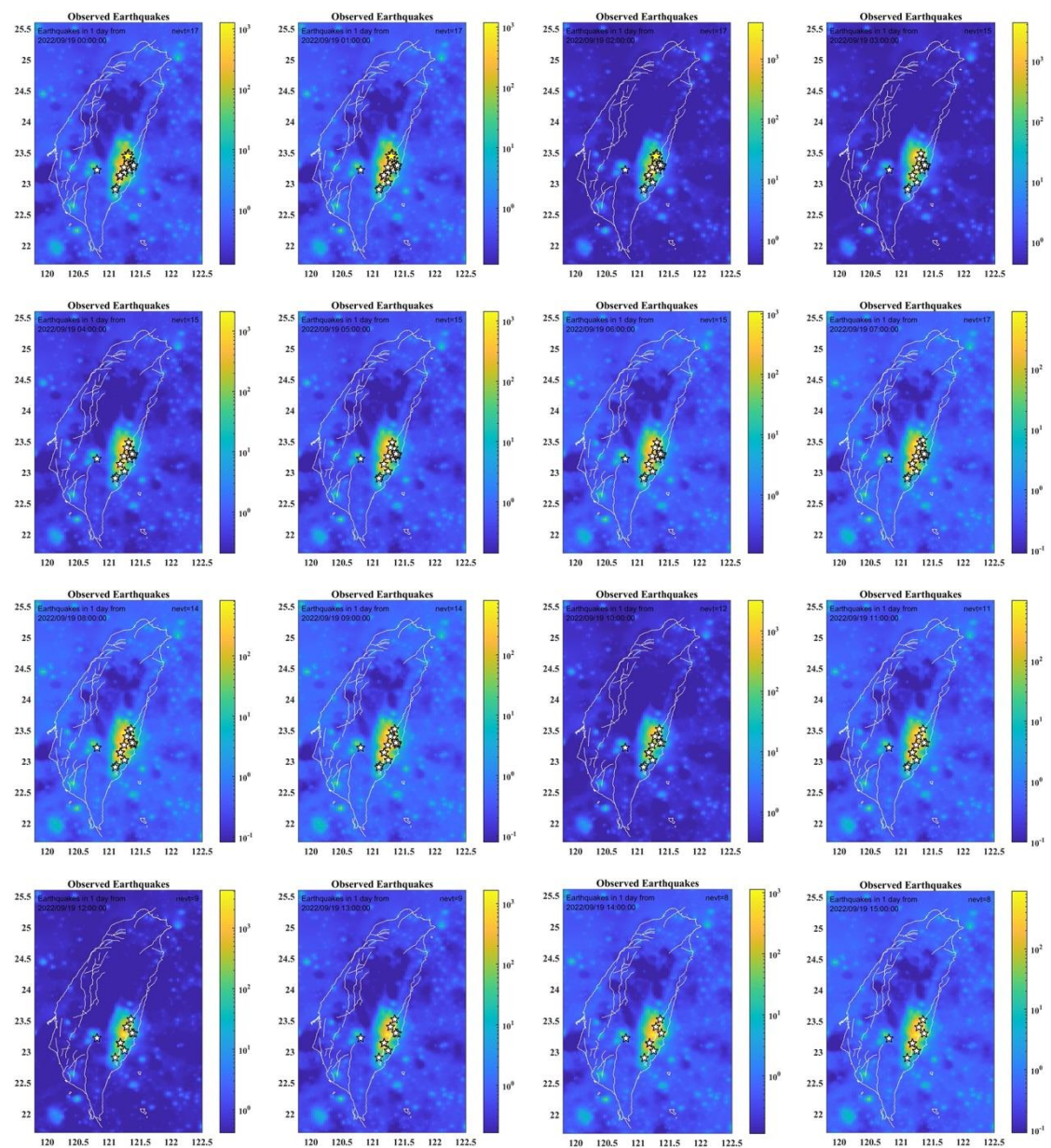
圖附 42 2022 年 09 月 17 日 16 時至 09 月 18 日 07 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



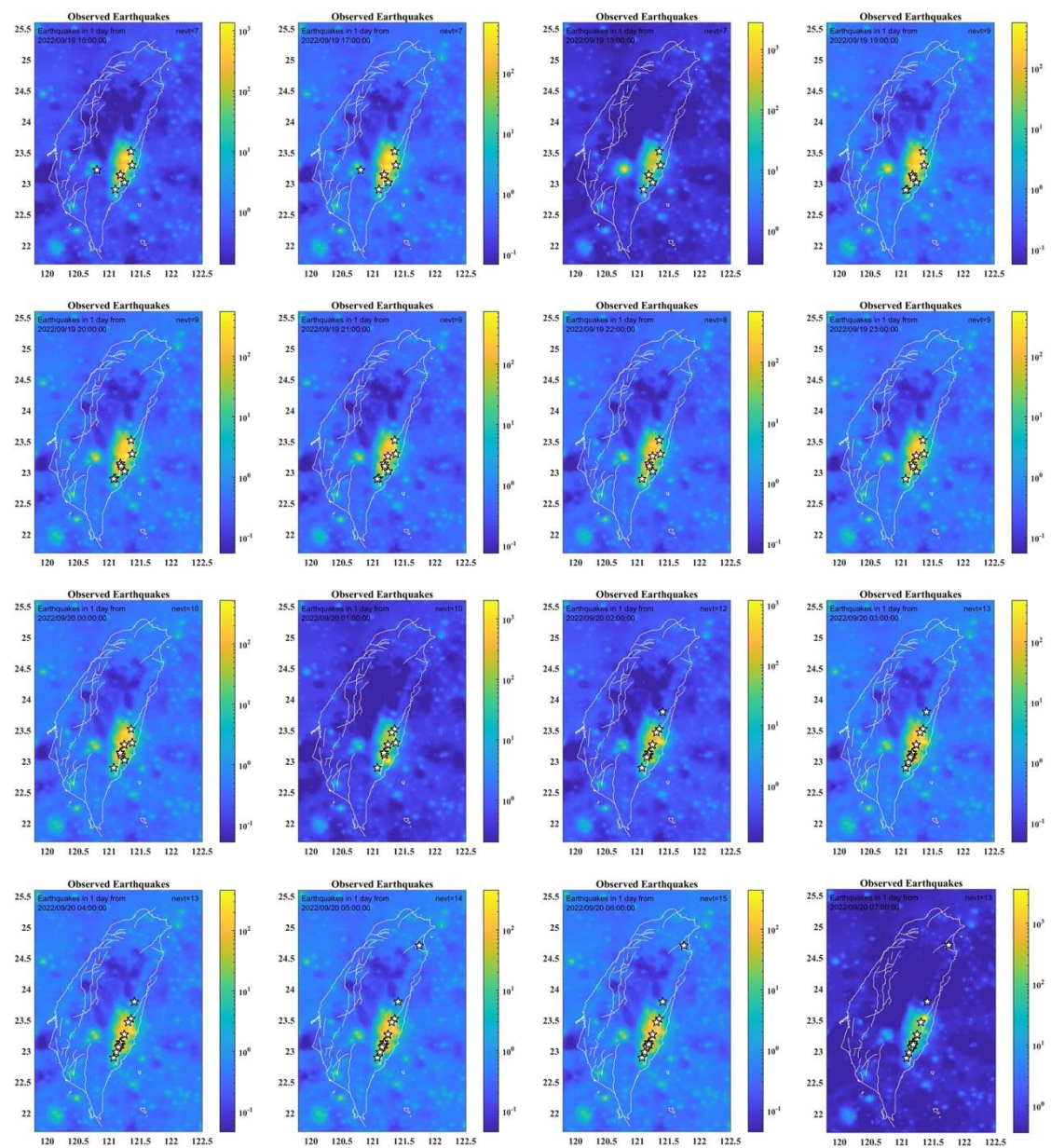
圖附 43 09 月 18 日 08 時至 9 月 18 日 23 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



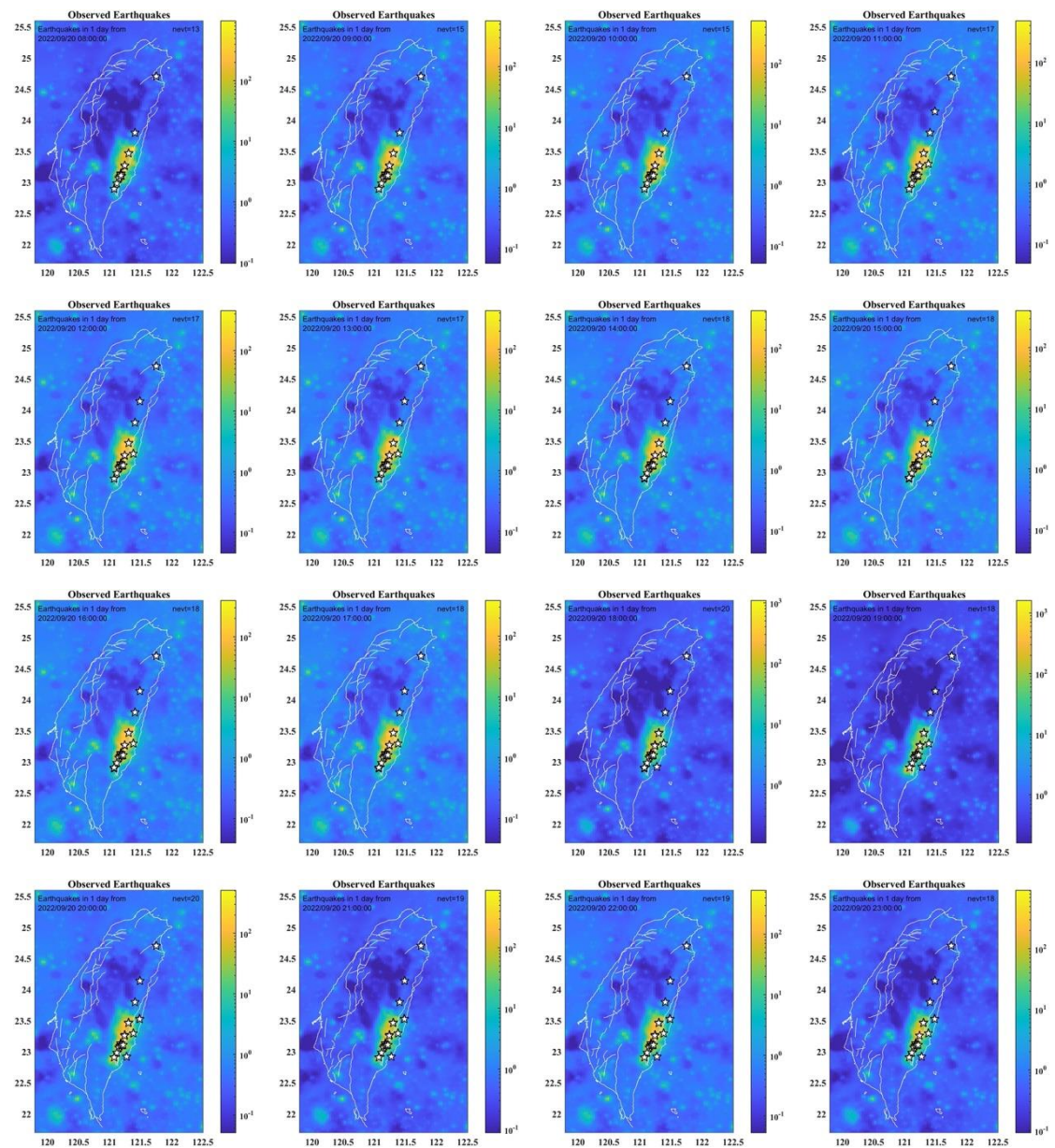
圖附 44 09 月 19 日 00 時至 9 月 19 日 15 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



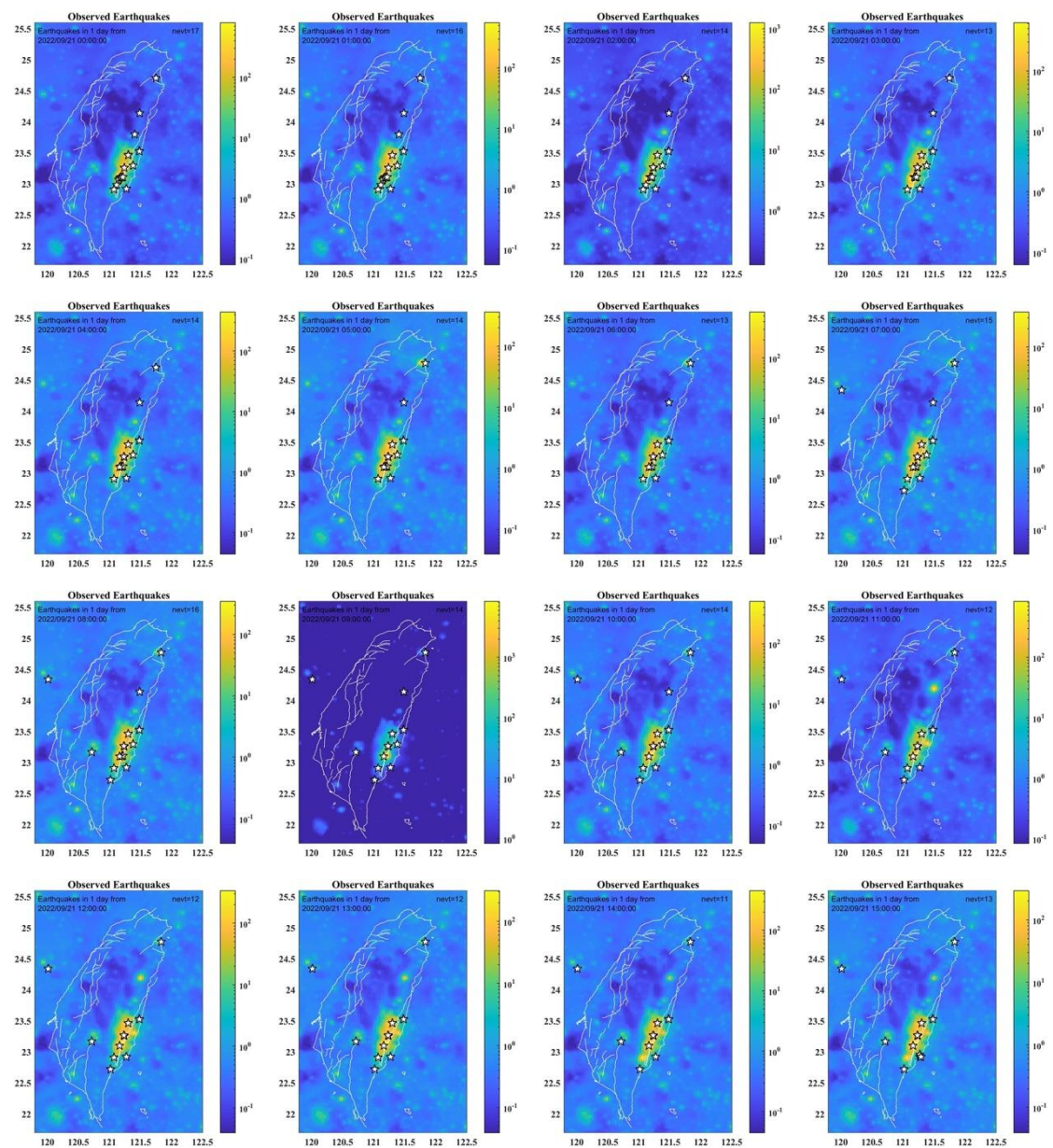
圖附 45 09 月 19 日 16 時至 9 月 20 日 07 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



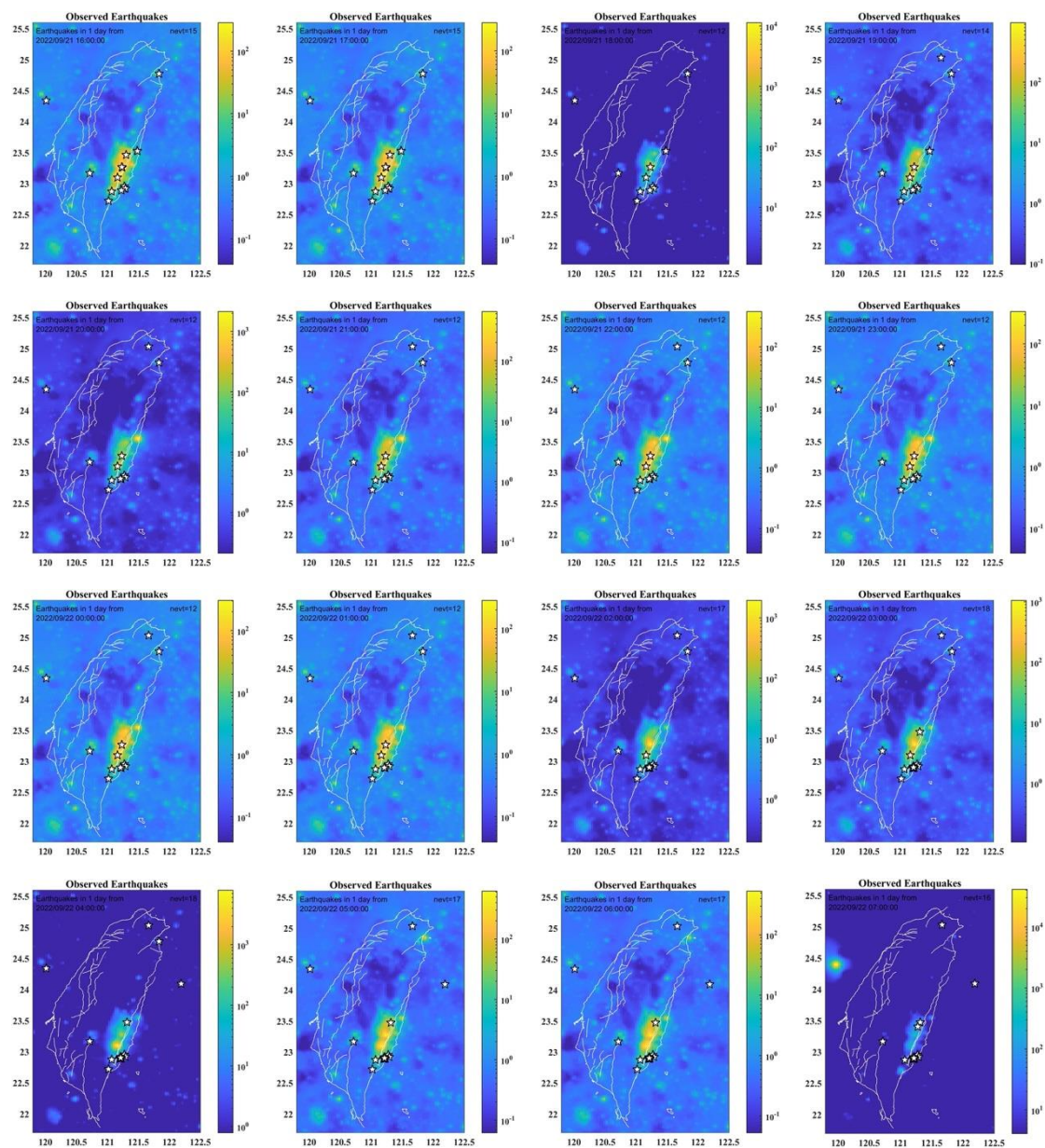
圖附 46 09 月 20 日 08 時至 9 月 20 日 23 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



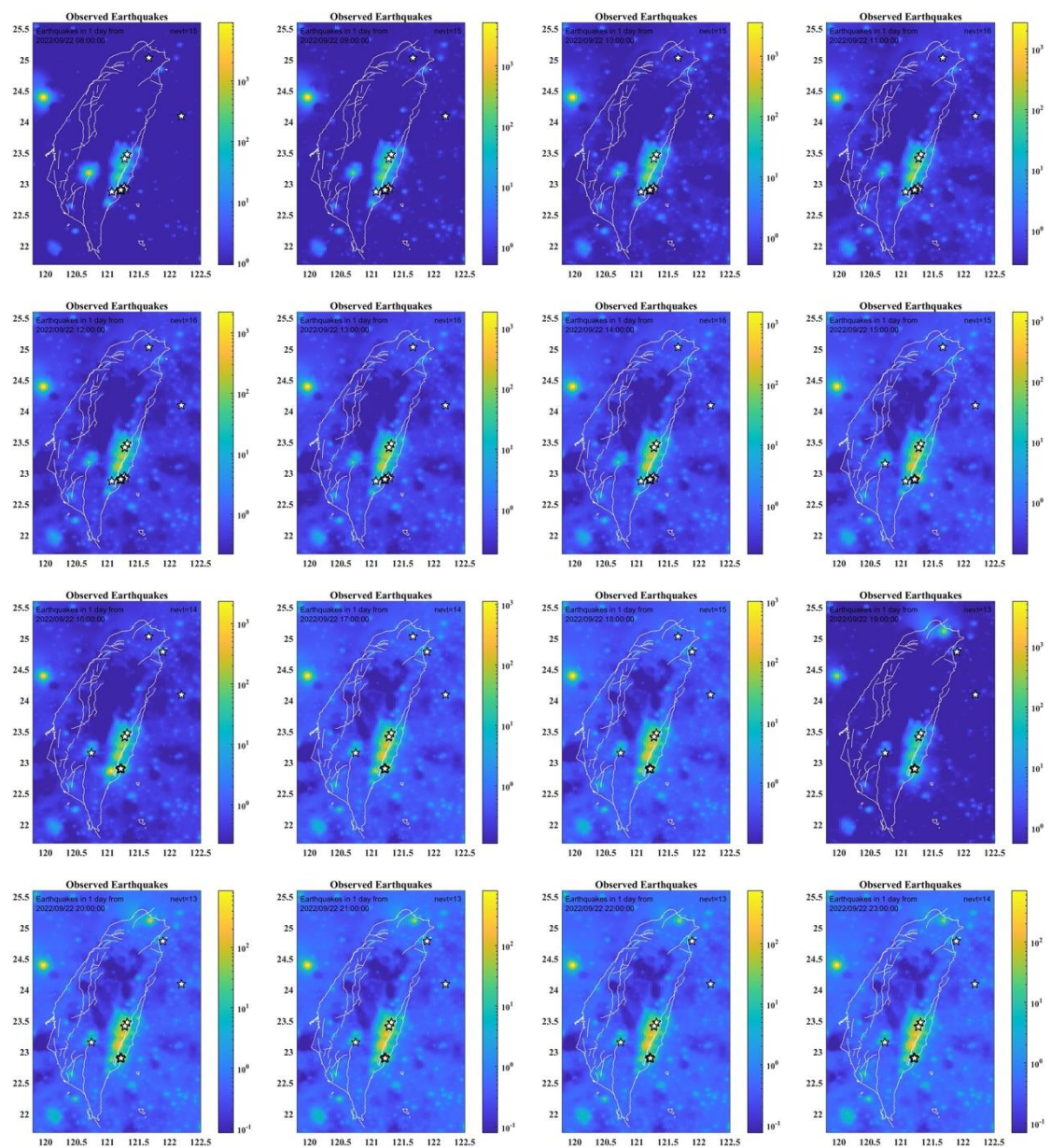
圖附 47 09 月 21 日 00 時至 9 月 21 日 15 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



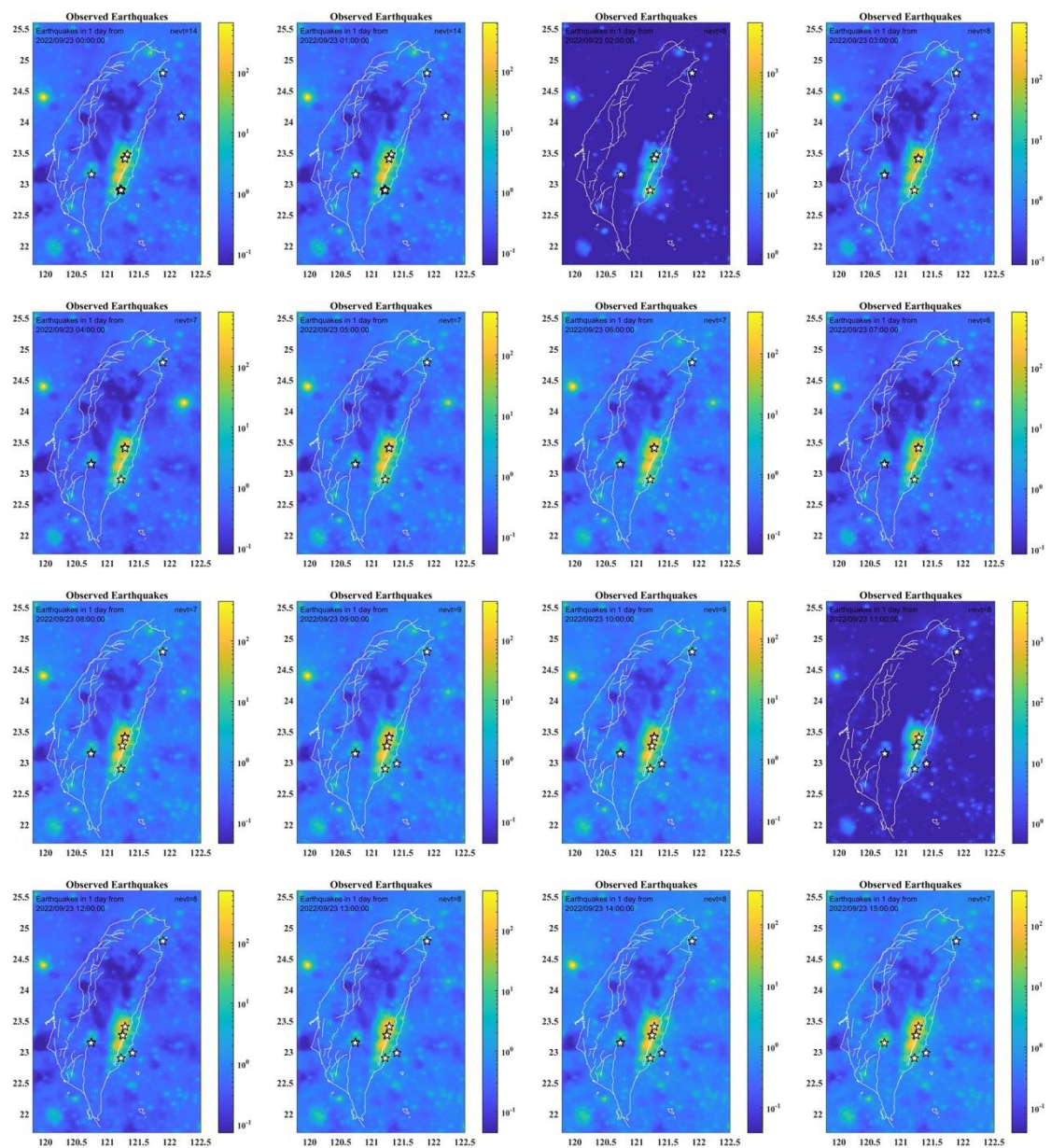
圖附 48 09 月 21 日 16 時至 9 月 22 日 07 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



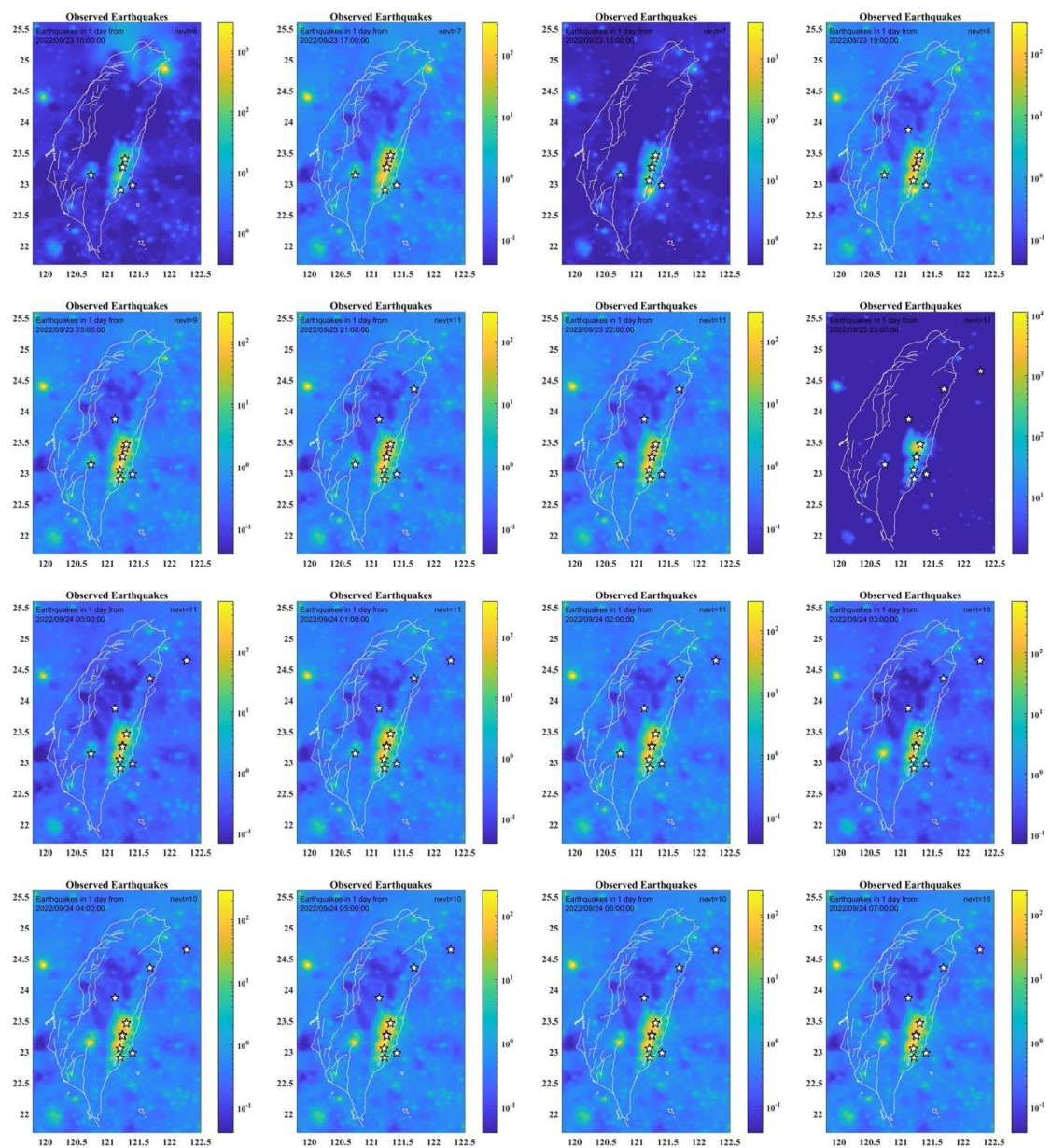
圖附 49 09 月 22 日 08 時至 9 月 22 日 23 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



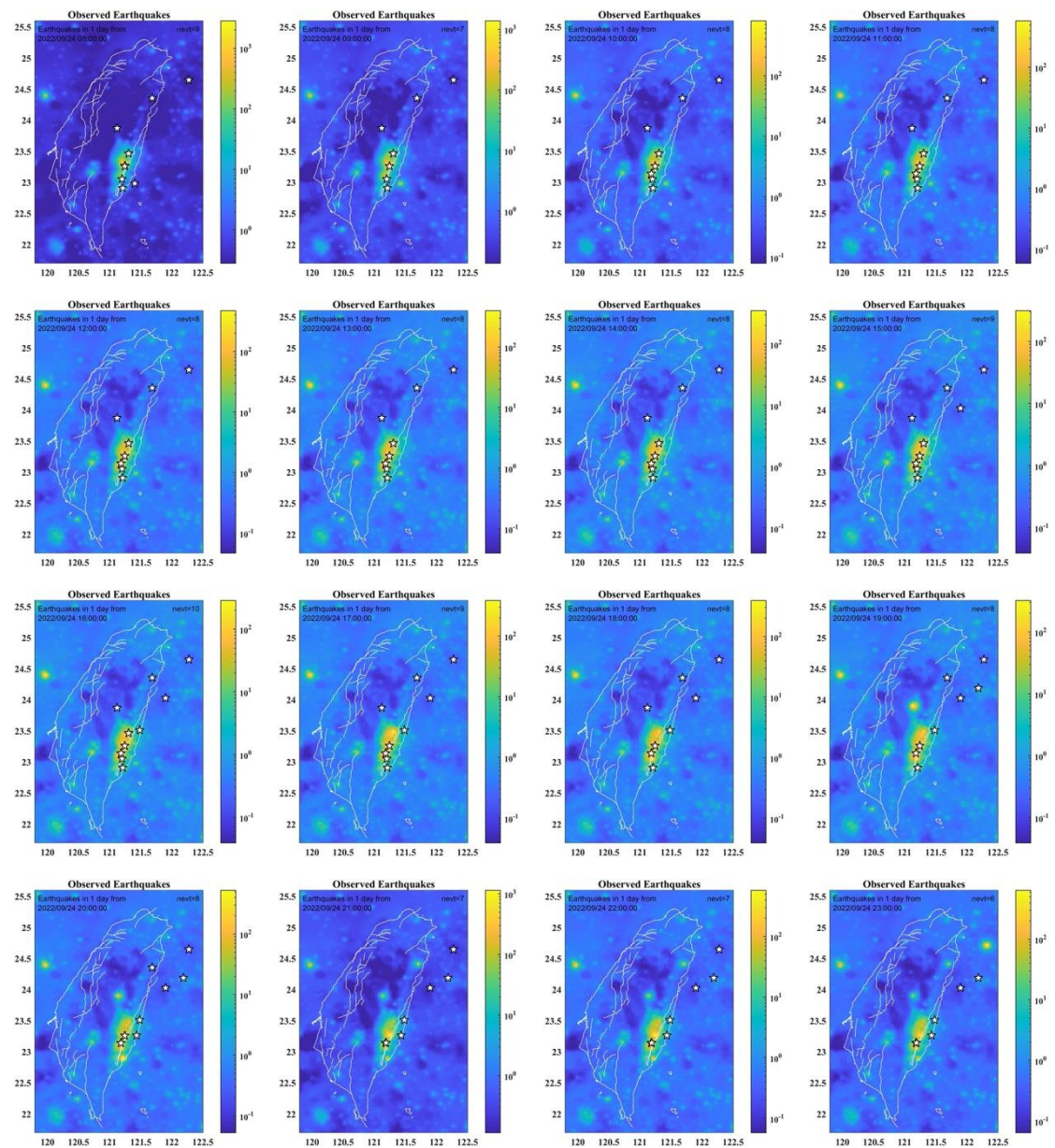
圖附 50 09 月 23 日 00 時至 9 月 23 日 15 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



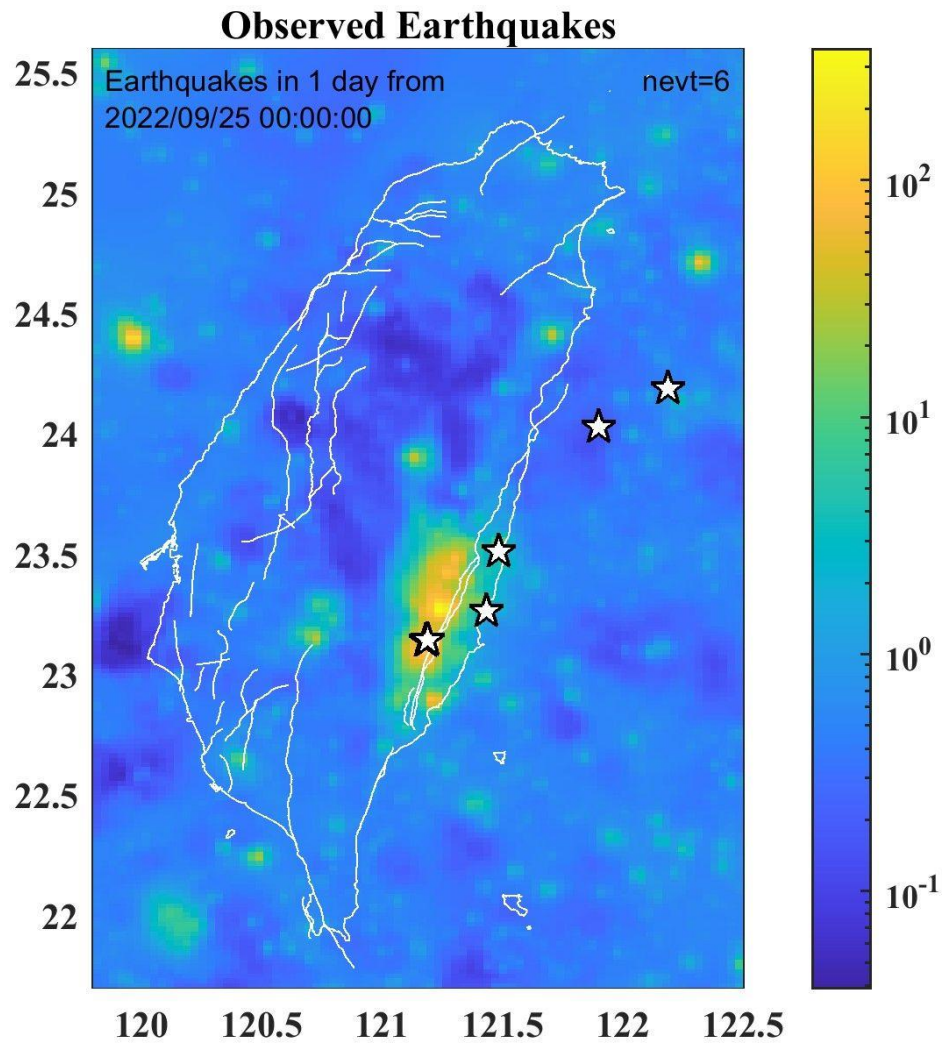
圖附 51 09 月 23 日 16 時至 9 月 24 日 07 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



圖附 52 09 月 24 日 08 時至 9 月 24 日 23 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。



圖附 53 09 月 25 日 00 時(UTC Time)之地震觸發能力與觀測地震比較

圖說同圖附 41。

臺灣地區 112 年中大型地震震源資訊之快速彙整與提供

子計畫四

地震預警系統中關鍵演算模組之優化

吳逸民 楊民

國立臺灣大學

摘要

地震預測目前還難以實用於地震減災，相對突顯地震預警系統的重要性。地震預警系統中最關鍵的流程為偵測 P 波到時及地震定位，要提供更多預警時間，系統需要持續優化，以縮短測報時間。因應不同問題所產生新的狀況持續修正，強化地震測報的穩定性，系統中關鍵的核心模組優化是一項需要經長期測試的工作項目。過去的 P 波偵測模組以振幅為主，本研究建立週期變化的 P 波偵測模組，稱為強化 T^{pd} 法。強化 T^{pd} 法挑選結果較 STA/LTA 法集中；傳統的 STA/LTA 法平均走時殘差為 1.1 秒，但強化 T^{pd} 法整體走時殘差平均值僅 0.6 秒，明顯有優化與顯著提升。另外，本計畫亦建立了多重地震定位模組，能有效偵測同時發生的多重地震，提升地震預警系統之準確度。綜合強化 T^{pd} 法挑選模組與新定位模組，其定位結果水平誤差為 6.9 ± 6.9 公里，垂直誤差則為 -0.2 ± 13.8 公里。且與 STA/LTA 法相較，強化 T^{pd} 法也明顯提升了定位穩定性。

關鍵詞：地震、地震減災、地震預警、地震預警系統

Abstract

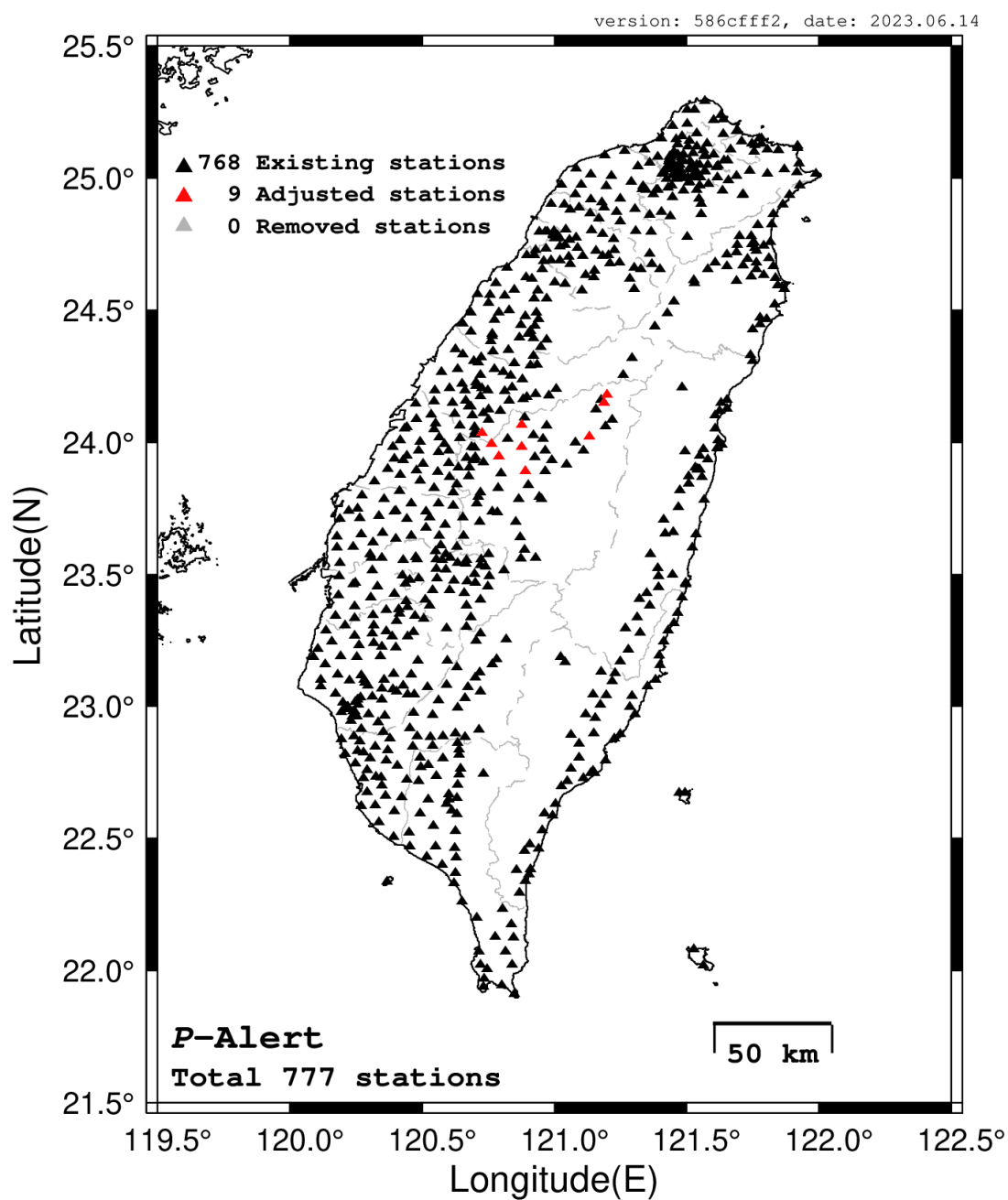
Current earthquake prediction methods are not yet viable for effectively mitigating seismic damage. Instead, an earthquake early warning (EEW) system stands out as an essential strategy in seismic hazard mitigation. Fundamental to the EEW system are the processes of automatically detecting P-wave arrivals and determining the earthquake's location in real time. Continuous advancements in the EEW system are necessary to minimize reporting times (thus providing earlier warnings) and to enhance the system's reliability. Upgrading modules within the EEW system is a continuous endeavor. Presently, most P-wave detection relies on amplitude information. To address this limitation, we have integrated a P-wave arrival picker that focuses on the seismic period into the EEW system, named the enhanced T^{pd} method. Our subsequent simulation tests

have shown that the enhanced T^{pd} method significantly reduces travel time residuals to an average of only 0.6 seconds, a marked improvement over the STA/LTA method, which has residuals of about 1.1 seconds. Moreover, we have introduced a module capable of detecting multiple earthquakes simultaneously. This advancement is crucial for avoiding false alarms and improving the accuracy of the system. By implementing a new location module and applying the results obtained from the enhanced T^{pd} method, the upgraded system has exhibited an average horizontal error of just 6.9 ± 6.9 km and a mean vertical error of -0.2 ± 13.8 km. This accuracy is a considerable improvement and illustrates the enhanced T^{pd} method's significant role in increasing the stability of the earthquake location process in comparison to the STA/LTA method.

Keywords: earthquake, seismic hazard mitigation, earthquake early warning, earthquake early warning system

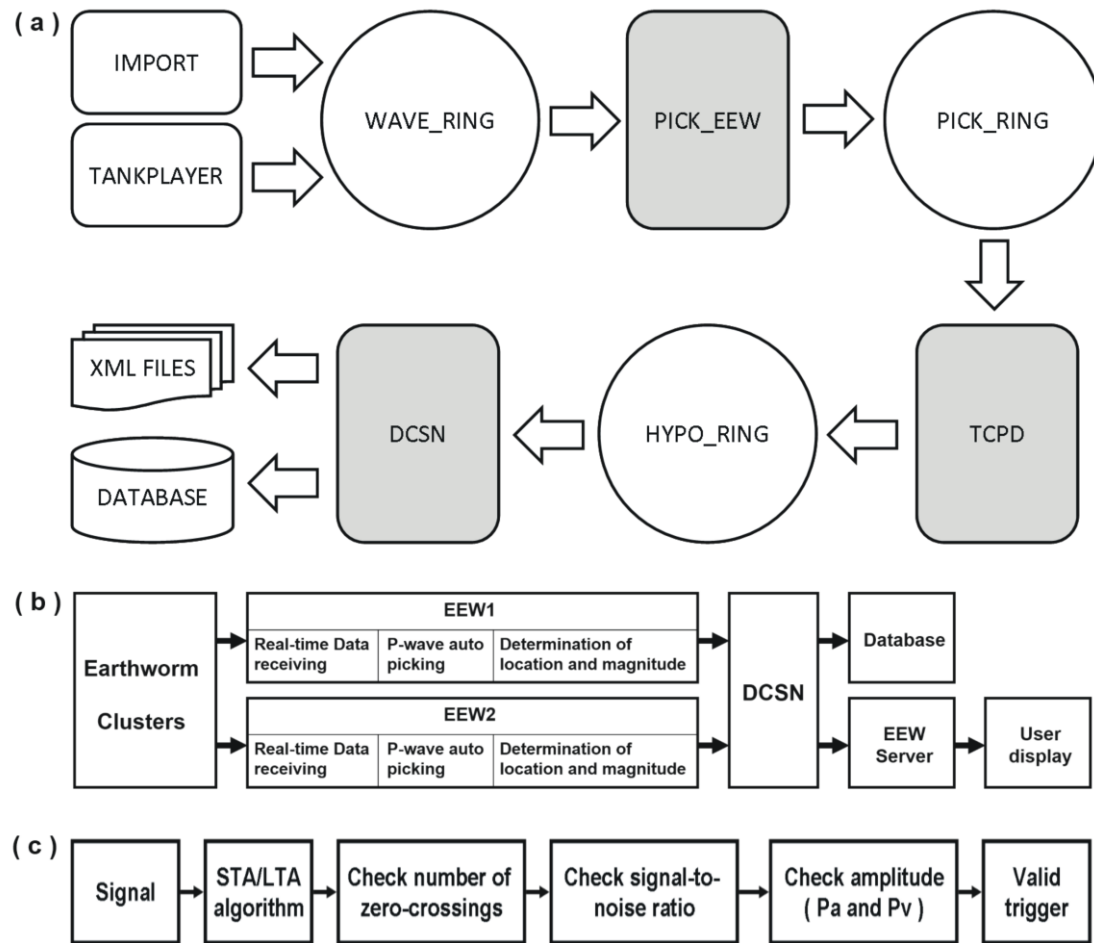
壹、研究背景

臺灣位於板塊交界處且屬於年輕造山區域，地震活動頻繁，中大型地震的發生就會釀成嚴重災害(Shin and Teng, 2001; Wu et al., 2016, 2019)。地震預測是有效的地震減災策略，然而其實現難度仍相當高，目前仍未能實用化。相對地，地震預警系統，目前廣泛運用於減災策略中(Lee and Wu, 2010)。臺灣於地震預警發展相當早，中央氣象署(Central Weather Administration, CWA)於1993年就開始發展，為國際的先驅，近年來也逐步落地實用(Wu et al., 1999, 2021)。除了中央氣象署外，國家地震工程研究中心(National Center for Research on Earthquake Engineering, NCREE)及國立臺灣大學(National Taiwan University, NTU)在這方面也有涉略。區域型地震預警目前以中央氣象署及臺灣大學為主，中央氣象署為區域型地震預警的國家權責單位。國立臺灣大學則是利用微機電系統感應器的P波警報器(Wu et al., 2013; Wu, 2015)建置而成的P-Alert觀測網有高密度的測站分布，如圖一所示於臺灣地區建立七百多站進行地震預警，同樣有針對區域地震預警開發，但是僅限於研究發展，技術成果與中央氣象署共同分享。目前，國立臺灣大學的P-Alert觀測網已經建立了777站。另外，國立臺灣大學的團隊亦發展即時震度圖系統(Yang et al., 2021)，對於地震防災能提供一定程度的幫助。



圖一、現行之 P-Alert 地震觀測網測站分布圖，截至 2023 年 8 月止。

中央氣象署及臺灣大學區域地震預警系統主要模組及處理流程如圖二所示，目前整體系統皆以 Earthworm 作為交換平台，進行後續地動訊號處理。其中，以 P 波到時挑選模組(PICK_EEW)及地震判斷及定位模組(TCPD)為最重要的區域預警模組。本計畫後續系統優化，亦將著重於此兩模組。



圖二、目前中央氣象署(Central Weather Administration, CWA)及臺灣大學兩系統中作用於區域地震預警的主要模組及處理流程(Chen et al., 2015)。

貳、研究方法及進行步驟

PICK_EEW 及 TCPD 兩模組為地震預警系統中關鍵演算模組。對 P 波到時的挑選，過去多在訊號的振幅上操作，例如：短時間與長時間平均的比值(STA/LTA)、AIC(Akaike Information Criterion)挑波器、LES(Local Extrema Scalogram)演算法(Huang and Wu, 2019)。其中，LES 演算法是應用小波分析能利用地震波峰性質尋找 P 波極值的特性發展而出，能尋找接近週期波動的起始時間，不受隨機雜訊的影響造成到時誤判。過去，本研究團隊將 LES 演算法重構開發，改寫為 C 代碼放入 P-Alert 處理主系統中進行測試。不過，LES 法運算至少需要實際 P 波抵達後 1~2 秒的資料，才能有效挑選 P 波到時，再加上所需的運算量較 STA/LTA 高上許多。因此，本研究又參考了近年來針對挑選低訊噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)訊號的相關研究，如強化 T^{pd} 法(Yamada and Mori, 2022)、碎形維度 STA/LTA 法(Zhang et al., 2017)等。其中以 Yamada and Mori (2022)提出利用周期的特徵值來進行 P 波挑選的強化 T^{pd} 法，結果明顯優於一般 STA/LTA 方法。其簡要方法流程如圖三所示。此

方法是以週期的特徵值變化來挑選 P 波，所以仍能挑出藏於噪訊中較弱的 P 波訊號。然而，對於預警的運用仍須被測試。畢竟預警系統主要針對大型地震，通常有較高的訊噪比，能挑選較弱 P 波訊號的方法，在實際運用中可能反而會造成困擾。另外，Yamada and Mori (2022)除提出利用周期的特徵值來挑選 P 波外，也提出了一套對到時再確認(Refinement)的流程。通過再確認後，整體到時準確度可以再提升約 0.1 秒；而在較噪訊較多且雜亂的環境中，則可提升更多。此到時再確認的流程，應也能運用於 STA/LTA 所挑選的到時上。

Algorithm 1 Outline of the refined T^{pd} method.

```

while end of data do
  * Compute  $T_{pd}$ , smoothed derivative  $dT^{pd}$ , and the largest change in 3s  $\Delta T_{max}^{pd}$ 
   $T_i^{pd} = 2\pi \sqrt{\frac{X_i}{D_i + D_s}}$ 
   $dT_i^{pd} = (T_{i+1}^{pd} - T_{i-2}^{pd}) / (3 * dt)$ 
   $\Delta T_{max}^{pd} = \max(T_i^{pd} - T_j^{pd}), j \in (\text{previous } 3 \text{ s})$ 

  if  $\Delta T_{max}^{pd} > c_1 \wedge 5 \text{ s}$  passed from the previous trig then
    if 20 s passed from the prev. trig  $\vee$  (within 20 s  $\wedge \Delta T_{max}^{pd} > \Delta T_{max}^{pd}(\text{prev.})$ ) then
      * Signal detected. Refine the arrival time in the previous 0.15 s.
      for  $j = (i - 0.15/dt) \rightarrow i$  do
        if  $T_j^{pd} < (T_i^{pd} - 0.5\Delta T_{max}^{pd}) \leq T_{j+1}^{pd}$  then
          refined time step =  $j$ 
        end if
      end for
      if not refined then
        for  $j = (i - 3/dt) \rightarrow i$  do
          if  $T_j^{pd} < (T_i^{pd} - 0.8\Delta T_{max}^{pd}) \leq T_{j+1}^{pd}$  then
            refined time step =  $j$ 
          end if
        end for
      end if
      * Additional refinement in the previous 1 s from the first refinement.
      for  $k = (j - 1/dt) \rightarrow j$  do
        if  $dT_k^{pd} < 0.01 \leq dT_{k+1}^{pd}$  then
          refined time step =  $k$ 
        end if
      end for
    end if
  end while

```

圖三、 T^{pd} P 波到時挑選流程(From Yamada and Mori, 2022)。

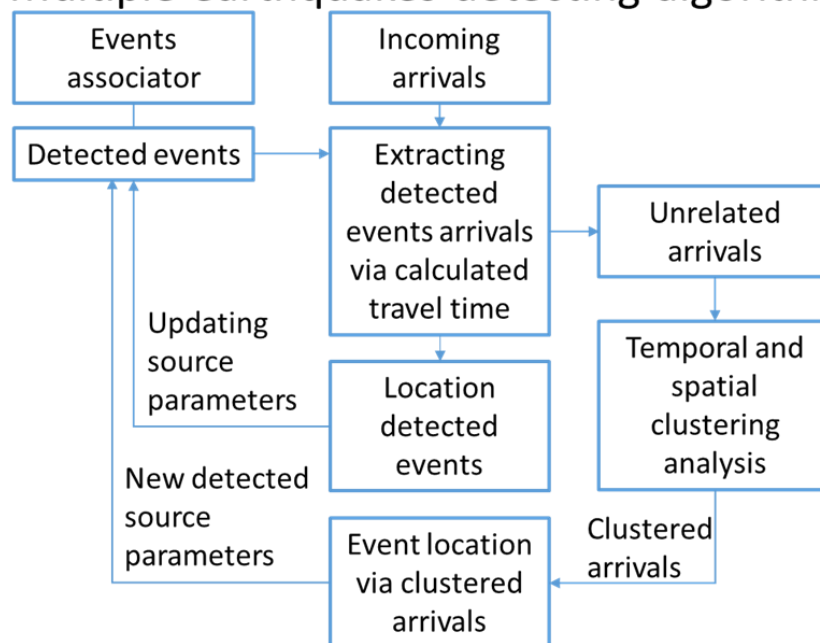
另外，期中報告的結果顯示 LES 法及強化 T^{pd} 法確實優於既有的 STA/LTA 法，特別是在初達波振幅不明顯時。亦提到強化 T^{pd} 法的觸發位置與實際 P 波到時可能有 3 秒延遲。但在大量實際測試後，發現多數挑選結果都能在與 STA/LTA 法接近的時間送出，甚至更快。僅有少數挑選結果會延遲 1 秒，至多 2 秒。另外，相較 LES 法，強化 T^{pd} 法在運算邏輯上較合乎即時運算，計算需求更少，針對即時系統

的優化空間更大。綜合運算量與即時性之效能，本研究決定以強化 T^{pd} 法作為主要挑選方法，進行後續的事件測試。

本研究以 Earthworm 做為後續測試平台，並使用 tankplayer 將 *P-Alert* 系統封存的事件波形紀錄以原始時間戳記回放至共享記憶體內。接著使用強化 T^{pd} 法挑選模組掃描所有波形紀錄，產生到時資訊，並予後續新的定位模組(延伸自 TCPD 模組)分析及輸出報告。比較基準為既有的 STA/LTA 法，故前述流程同樣應用於 STA/LTA 法挑選模組。最後，再比較、分析兩組輸出報告的到時紀錄。本研究共測試了 2012 至 2023 年間芮氏規模大於 5.5，且既有 *P-Alert* 系統有高於 12 個測站被觸發的事件，共 55 筆，詳如表一。

TCPD 模組的改進將辨識多重地震納入考量。過去 TCPD 模組較少遇到多重地震辨認的問題，直至近期 2022 年的台東地震序列，除了餘震較多，也發生多重地震造成誤判的情形。因此，本計畫已建立能處理多重地震的 TCPD 模組雛形。圖四所示為多重地震事件之即時監測流程圖，其運行概念為：即時監測系統中，P 波到時會不斷地被偵測並存入共享記憶體中。而系統則會建立一個已偵測地震清單，監測時會依據清單中的地震，從 P 波到時共享記憶體中取出與之相關聯的到時，並進行地震定位。定位完成後，會更新已偵測地震清單的資訊。在此監測系統中，仍會採用 Geiger 法(Geiger, 1912)，並以半空間速度遞增的地震波速度模型來計算走時及定位。主要考量到計算快速及逆推過程中不容易產生局部極小值，可以加速定位的效率。一般層狀的速度構造及三維速度構造都有局部極小值的問題，容易導致地震定位收斂的不穩定。

Multiple earthquakes detecting algorithm



圖四、多重地震事件之即時監測流程圖。

未與偵測地震關聯的測站到時則會建立新的時空叢集分群。時空叢集分析中，空間關聯的距離會以目前平均測站間距的 1.5 倍為連結單位，當然，也能以該站最靠近的第 n 測站距離為連結單位， n 合理的設定應為 3 到 8 之間。時間的連結單位則可以距離連結單位除以 P 波地表的視速度(Apparent velocity)求得：假設距離連結單位為 30 公里，以 P 波地表的視速度 6.5 公里每秒來計算，時間的連結單位就約為 4.6 秒。依現有觀測站分布情形，平均測站間距的 1.5 倍為連結單位較一般化，是相對穩定且容易的關聯條件；但若在設站不密集的區域或較為偏僻的單站，如安裝於外島的測站，會較不容易被關聯。針對這些測站，改以該站最靠近的第 n 測站距離為連結單位。如此，不同的測站間可以有不同的關聯參數，以及要以第幾個測站做為關聯門檻。

同一時空叢集內的 P 波到時若大於 4 到 6 個，就可進行地震定位。完成後的震源參數則更新到地震清單，最後再由事件關聯分析模組，進行分析，其主要的功能為整合時空相近的地震。因為在叢集分析時，有可能將屬於同一地震的到時，分配到不同的時空叢集中進行定位。因此，在發出最終定位結果前，尚需要事件關聯分析或決策分析，整合時空相近的地震，避免對同一地震發出兩份警報的窘況。礙於前期建置的邏輯觀念探究耗時且開發時間匆促，但現階段上述流程已大致建立，後續將進一步測試。

表一、2012 至 2023 年間芮氏規模大於 5.5，P-Alert 系統有高於 12 個測站被觸發的事件列表。灰底為島內事件；白底則為外海事件。

Time(UTC)		CWA report			
		Long. (°E)	Lat. (°N)	Depth (km)	M _L
2012/11/20	17:09:02	121.40	22.45	17.5	5.5
2013/03/07	03:36:46	121.49	24.31	15.2	5.6
2013/03/27	02:03:20	121.07	23.90	15.4	6.1
2013/06/02	05:43:04	121.00	23.87	10.0	6.3
2013/10/31	12:02:09	121.42	23.55	19.5	6.3
2014/05/21	00:21:14	121.45	23.74	18.0	5.9
2015/02/13	20:06:31	121.46	22.66	18.4	6.1
2015/03/23	10:13:51	121.76	23.70	26.3	6.0
2015/04/20	11:20:47	121.75	23.63	32.6	5.5
2015/09/01	13:24:46	121.55	23.91	20.3	5.5
2015/09/15	19:37:36	121.81	24.28	15.3	5.6

2015/09/16	13:09:00	121.86	24.31	17.8	5.5
2015/11/01	21:09:42	121.60	22.71	18.9	5.9
2016/01/19	02:13:26	121.38	22.75	20.4	5.7
2016/02/05	19:57:27	120.54	22.93	16.7	6.4
2016/04/27	15:17:15	121.81	24.25	10.0	5.6
2016/04/27	18:19:06	121.30	23.26	18.2	5.5
2016/05/12	03:17:15	121.95	24.69	17.5	5.8
2016/05/12	04:29:56	122.00	24.68	16.4	5.5
2016/10/06	15:52:00	121.40	22.61	20.0	6.0
2017/02/10	17:12:53	120.12	22.90	18.4	5.6
2017/05/15	23:12:54	121.47	23.25	21.9	5.7
2017/09/20	14:29:57	121.76	23.33	15.3	5.7
2017/11/22	14:20:10	120.73	23.59	18.5	5.5
2018/02/04	13:56:42	121.83	24.15	16.0	5.8
2018/02/06	15:50:43	121.69	24.14	10.0	6.0
2018/02/07	15:21:32	121.79	24.12	10.0	5.7
2018/02/21	23:10:40	121.67	23.36	32.8	5.6
2018/12/15	21:21:06	121.90	23.74	30.0	5.6
2019/04/03	01:52:55	120.85	22.95	10.0	5.6
2019/04/18	05:01:07	121.54	24.06	18.8	6.1
2019/06/04	09:46:19	121.59	22.85	13.9	5.6
2019/08/07	21:28:04	121.91	24.43	22.5	6.0
2020/02/15	11:00:06	121.52	23.84	10.5	5.5
2021/04/18	14:11:40	121.49	23.87	15.0	5.8
2021/04/18	14:14:38	121.48	23.86	13.9	6.2
2022/02/07	10:58:25	121.94	24.41	34.6	5.6
2022/03/09	12:22:14	121.44	23.25	34.5	5.6
2022/03/22	17:41:40	121.52	23.43	30.6	6.6

2022/03/22	17:42:39	121.48	23.43	28.0	5.7
2022/03/22	17:43:26	121.46	23.46	19.3	6.1
2022/03/22	19:35:04	121.52	23.48	26.0	5.8
2022/03/22	20:29:59	121.44	23.42	21.0	5.8
2022/06/20	01:05:08	121.47	23.68	6.8	6.0
2022/09/17	13:41:19	121.16	23.08	8.6	6.6
2022/09/17	14:45:28	121.19	23.12	5.8	5.8
2022/09/18	05:19:19	121.18	23.13	12.1	6.1
2022/09/18	06:32:03	121.20	23.14	7.8	5.7
2022/09/18	06:44:15	121.20	23.14	7.8	6.8
2022/09/18	08:46:32	121.18	23.12	13.9	5.6
2022/09/18	09:39:56	121.30	23.27	11.5	5.8
2022/09/19	02:07:45	121.30	23.44	13.4	6.0
2022/11/26	17:38:04	121.64	23.86	36.0	5.6
2022/12/15	04:03:16	121.85	23.78	16.3	6.5
2023/09/05	09:30:41	120.39	23.53	8.5	5.5

參、結果與討論

一、優化振幅變化的 P 波挑選模組及建立週期變化的 P 波挑選模組

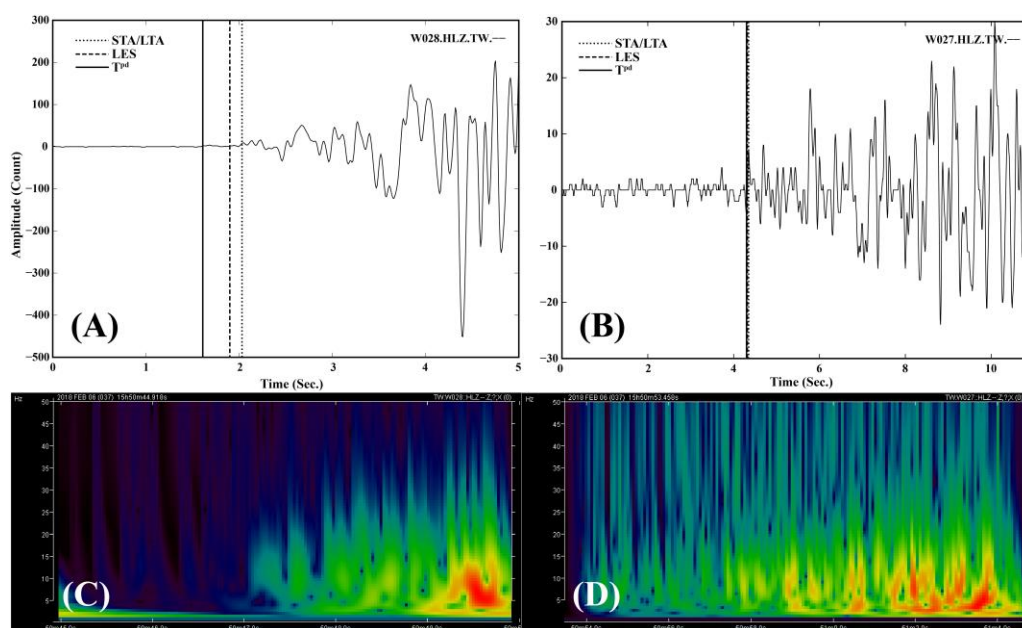
首先，在期中計畫中提到採用 STA/LTA 法的既有挑選模組(PICK_EEW)四個與主要到時挑選邏輯較不相關的潛在問題：

1. 模組對 P 波振幅計算結果與手動驗算結果有差異，且位移項(Pd)差異特別明顯。
2. 模組對 P 波振幅計算流程與常見流程不同，求取加速度型儀器的加速度值多了一次積分及微分的計算。
3. 模組對 P 波振幅計算結果的輸出未能完全對應後續 TCPD 模組的應用方式。
4. 計算 P 波到時與現在資料點的時間間隔方式有些許瑕疵，目前以累計點數作為計算根據，應改為直接比較時間戳記。

雖然這些問題並不影響挑選結果，但會影響地震規模評估。考量到整體程式複雜度，本研究決定直接將震幅相關的邏輯移出挑選模組，並且後續的新挑選模

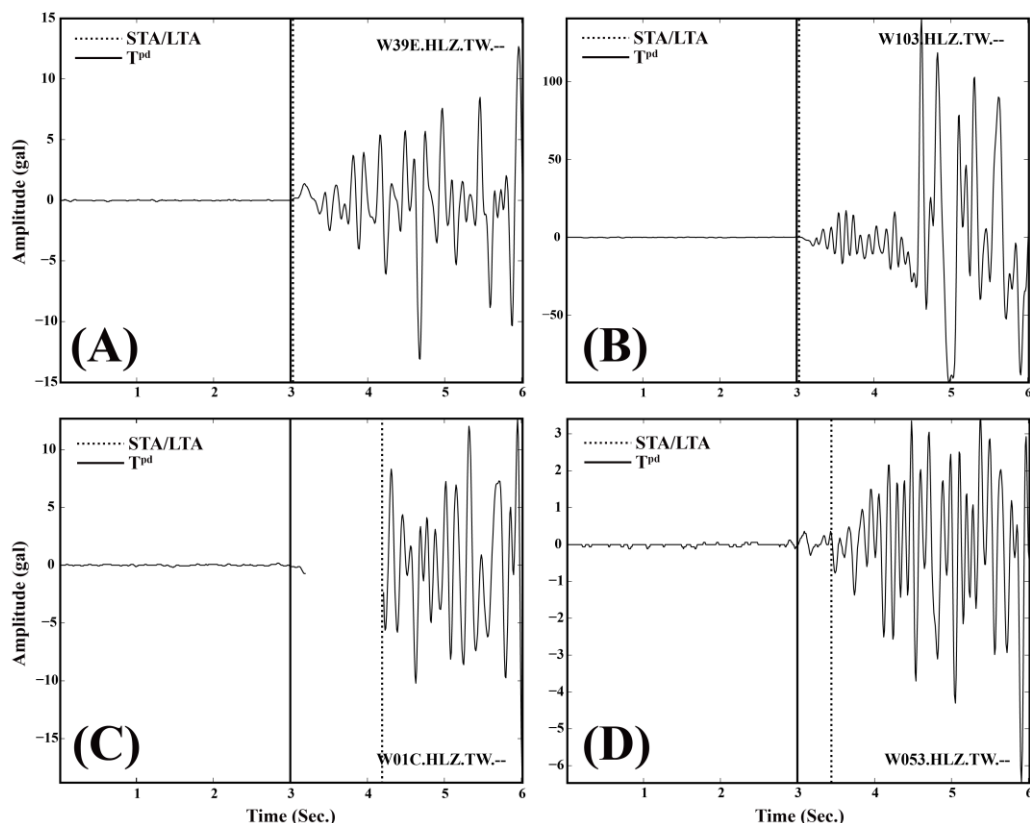
組亦將延續此作法。

另外，根據前期已完成的週期變化方法(強化 T^{pd} 法)的挑選模組建立，並針對 P-Alert 觀測網的訊號初步測試，結果比較範例如圖八。從測試結果可見，若 P 波初達(Onset)較明顯，如圖五(B)，STA/LTA 法的表現與新方法之間幾無差異；若是 P 波初達較不明顯，如圖五(A)，新方法較 STA/LTA 法則有顯著的優勢。



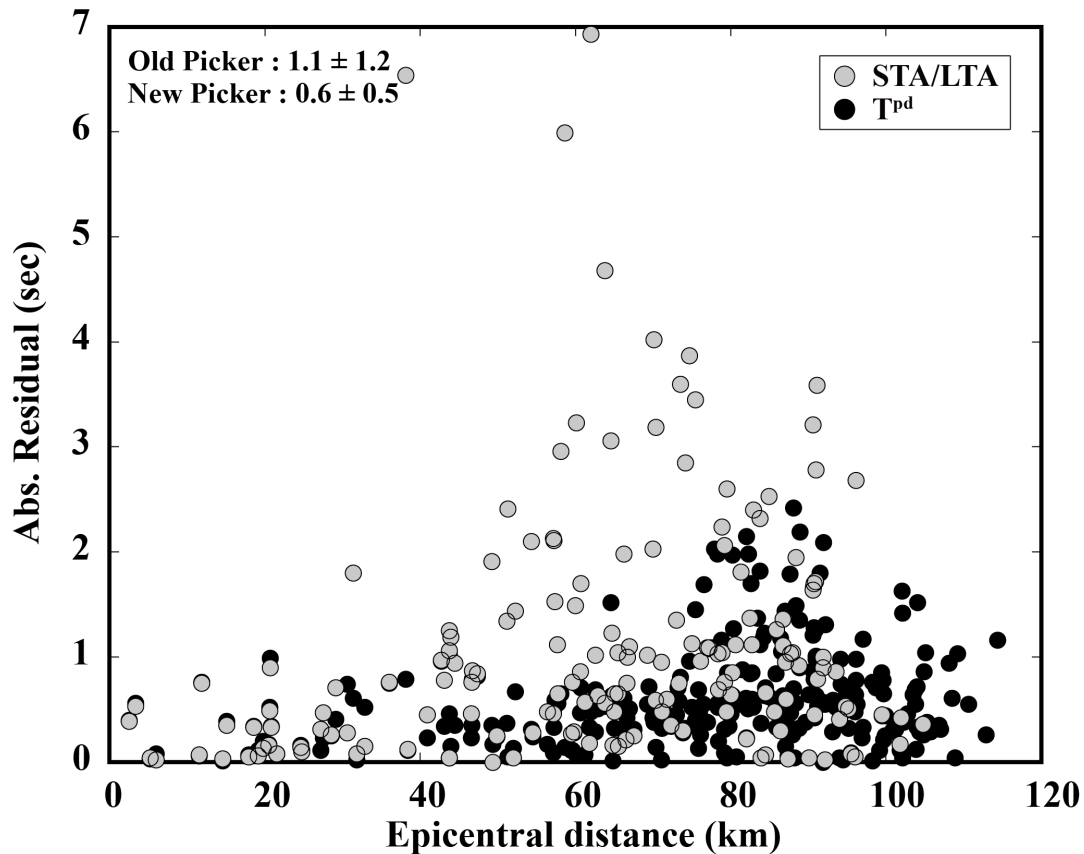
圖五、挑選方法結果比較圖。實線為強化 T^{pd} 法；黑線段為 LES 法；虛線則為 STA/LTA 法。訊號皆來自 2018 年 2 月 6 日芮氏規模 6.2 花蓮地震之紀錄。(A)為花蓮女中垂直向訊號，距震央約 18 公里；(B)則為鶴岡國小垂直向訊號，距震央約 73 公里；(C)為花蓮女中垂直向訊號時頻圖，時間軸上第一個標記對應(A)圖的 0 秒；(D)則為鶴岡國小垂直向訊號時頻圖，時間軸上第一個標記對應(B)圖的 1 秒。

本研究共測試表一中的 55 筆事件，根據 STA/LTA 法、強化 T^{pd} 法兩組輸出報告上的到時紀錄比較、分析。就初步的測試結果來看，強化 T^{pd} 法與 STA/LTA 法如圖六(A)及(B)有相似的挑選到時表現，這在震幅顯著(SNR 高)的紀錄下能被觀察到，挑選差距約只有數個紀錄點(Sample)。以圖六(B)的 W103 測站紀錄為例，兩演算法僅差 3 個紀錄點，即僅 0.03 秒的差距(採樣率為 100Hz)。如圖六(C)及(D)在震幅不顯著(SNR 低)時，兩者方法在判斷到時結果的差距會較大。以圖六(D)的 W053 為例，兩演算法在到時判斷差了 44 個紀錄點，即 0.44 秒的差距。此外，如圖六(C)所示，W10C 的紀錄正好在 P 波抵達後發生資料斷點的情形，少了 1 秒資料點，使得 STA/LTA 法判斷到了錯誤的位置，但強化 T^{pd} 法則仍是挑選在正確的位置上。此結果顯示強化 T^{pd} 法對微弱的初達 P 波更為靈敏，同時也能對資料中斷的情況能有所補強。



圖六、挑選方法於模擬系統結果比較圖。實線為強化 T^{pd} 法；虛線為 STA/LTA 法。訊號皆來自 2022 年 9 月 18 日芮氏規模 6.8 池上地震。(A)為台東瑞源國小垂直向訊號，距震央約 19 公里；(B)為台東池上氣體觀測站垂直向訊號，距震央僅約 2 公里；(C)為花蓮高寮國小垂直向訊號，距震央約 32 公里；(D)則為高雄桃源國中垂直向訊號，距震央約 44 公里。

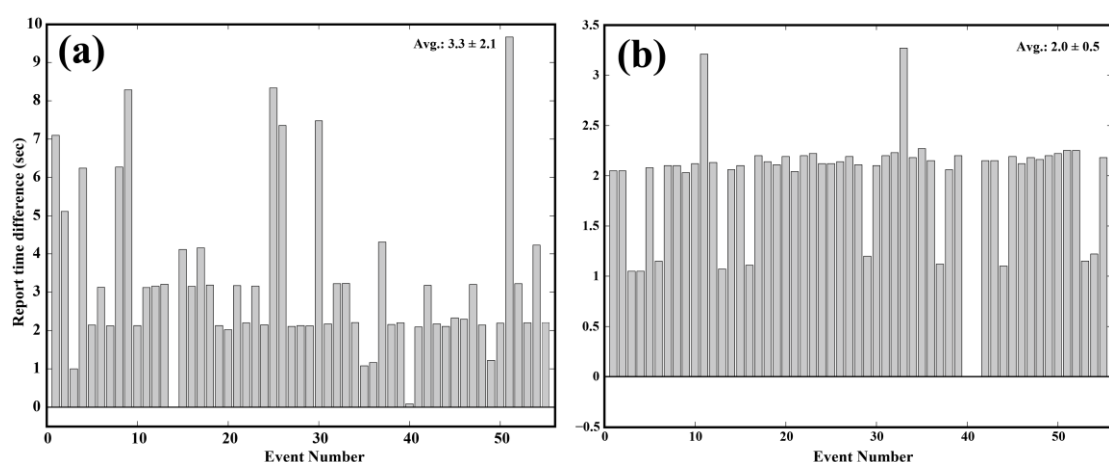
通常地震波震幅的大小與震央距離有反向關係。為進一步驗證強化 T^{pd} 法的整體表現，進一步探討波形震幅的大小與震央距離，本研究利用氣象署目錄計算理論到時，與兩種演算法所得觀測到時相減得到時殘差，再取絕對值與測站震央距作圖，結果如圖七。由於目錄統計數據資料點數過多，本報告僅以 2022 年 9 月 18 日芮氏規模 6.8 池上地震為例。從圖中明顯可見，強化 T^{pd} 法挑選結果較 STA/LTA 法集中。強化 T^{pd} 法整體殘差平均值僅 0.6 秒，標準差僅有 0.5 秒；而 STA/LTA 法的平均值則為 1.1 秒，標準差達 1.2 秒，強化 T^{pd} 法明顯較優。但若聚焦於震央距小於 40 公里的結果統計分析，可以注意到兩演算法的差異其實沒有明顯的差異。從這種結果推論，對島內事件且系統觸發初期，觸發測站之震央距仍小於 40 公里的報告分析定位結果，對島內地震而言在初始觸發的測站組成，及定位結果上，兩演算法間幾乎有著相同的結果。



圖七、不同挑選方法到時殘差對震央距分布圖。黑點為強化 T^{pd} 法；灰點為 STA/LTA 法。此處測試資料來自 2022 年 9 月 18 日芮氏規模 6.8 池上地震。

不過，若將焦點置於報告產出時間，探討整體時效性的部分，其差異則相對顯著。根據產出報告，本研究認為挑選門檻可能為因素之一。故嘗試將強化 T^{pd} 法的挑選權重門檻設為 2，而 STA/LTA 法挑選權重門檻為 3 時，兩者報告產出時間差異平均仍可達 3 秒以上(STA/LTA 法減去強化 T^{pd} 法)，也代表著使用 STA/LTA 法報告時間產製時間會比強化 T^{pd} 法慢上 3 秒。即使嘗試將 STA/LTA 法挑選權重門檻上調為 4，平均差距亦仍有 2 秒的差距(如圖八)。未來可能需要更深入解析既有 STA/LTA 法的程式，除了挑選 P 波外，還會求取如 P_a 、 P_v 、 P_d 及 τ_c 等 P 波數值。雖說這些都是評估規模必要的數值，但鑒於 Earthworm 平台資料共享及平行處理的概念，及上述運算量及延遲因素，實應另建一新的模組專門處理。因此，本研究決定將規模評估相關運算與挑選模組分離，甚至也將之從定位模組中分離，使各模組關注的事務更為單純，也使後續調整更為容易。

關於新挑選演算法的初步結果，大致如前所述；至於實際應用後定位結果提升與否，則將於下一個討論定位模組的部分，一併討論。



圖八、應用 STA/LTA 法減去應用強化 T^{pd} 法地震報告產生時間差值圖(a) STA/LTA 法權重門檻為 3 時；(b) STA/LTA 法權重門檻上調為 4 時；強化 T^{pd} 法的權重門檻皆設為 2。

二、多重地震事件之即時監測初步測試結果

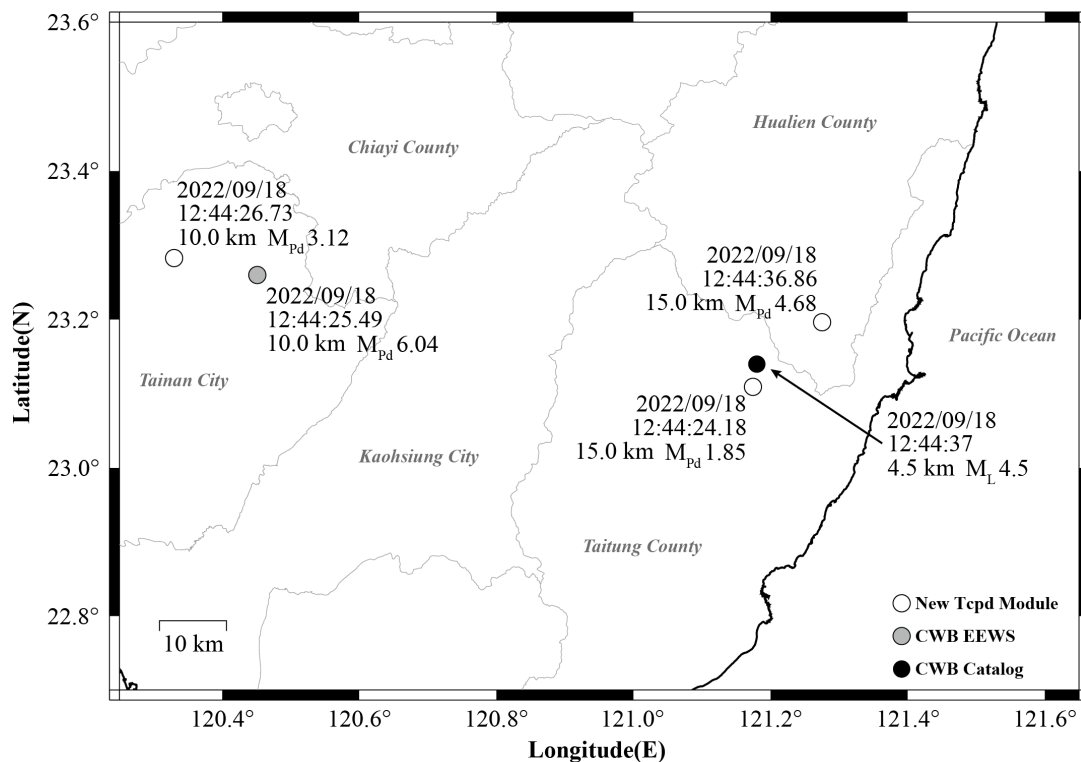
本計畫所描述的多重地震事件之即時監測流程，過去還沒有人嘗試過。因此，根據前述概念流程，投注資源改寫既有 TCPD 模組，嘗試實現多重地震的即時分辨及定位。但礙於開發時間，及後續有待測試，目前還未能將其正式部署於即時系統之上，僅能先透過線下模擬測試驗證其可行性。本研究前期以中央氣象署地震目錄，挑選了數個發生多重地震，及短時間(間隔時間小於 60 秒)內接連發生地震的時段，詳如表二。

整體模擬測試流程如下：首先，收集這些時段內氣象署觀測網(CWASN+TSMIP)、P-Alert 觀測網、臺灣寬頻地震觀測網(BATS)及 NCREE 觀測網的波形紀錄，將之修剪為時段中規模最大事件發震前 1 分鐘到發震後 1 分鐘，共 2 分鐘長度的紀錄。模擬測試流程與前一段敘述相同，有收斂結果即產製出定位報告，並分析之。

表二、挑選多重事件列表

編號	發震時間(UTC)	緯度($^{\circ}$ N)	經度($^{\circ}$ E)	深度(km)	規模
1	2022/03/24 00:38:13.7	23.44	121.46	25.6	4.4
	2022/03/24 00:38:26.0	23.44	121.43	25.0	5.7
2	2022/06/20 01:05:07.7	23.69	121.45	7.0	6.0
	2022/06/20 01:05:47.2	23.69	121.42	7.9	5.2
3	2022/09/18 12:44:37.2	23.14	121.19	15.0	4.68

在期中報告時指出，由於測試資料混雜了多個不同觀測網的資料，該模組收斂的結果並不如預期。其中由於定位結果偏差較大，連帶使得規模估計偏高。這點或許能在未來的測試中，純化採用的測站及調整各系統間的時間基準而能有所改善。且比較目錄中獨立事件的數量，該模組仍有將單一事件分裂的情形，這也代表該模組對到時資訊的關聯邏輯應還有進步及調整空間。且關聯的測站到時資訊混雜，亦會造成規模估計的誤差。另外，該模組在最後一筆測試中(如圖九)，結果較前面兩筆穩定。原因在於該多重事件在空間上有明顯差距；這與前面兩筆多重事件不論在時間還是空間都相距較近，有著關鍵的差異，值得後續深入研究。



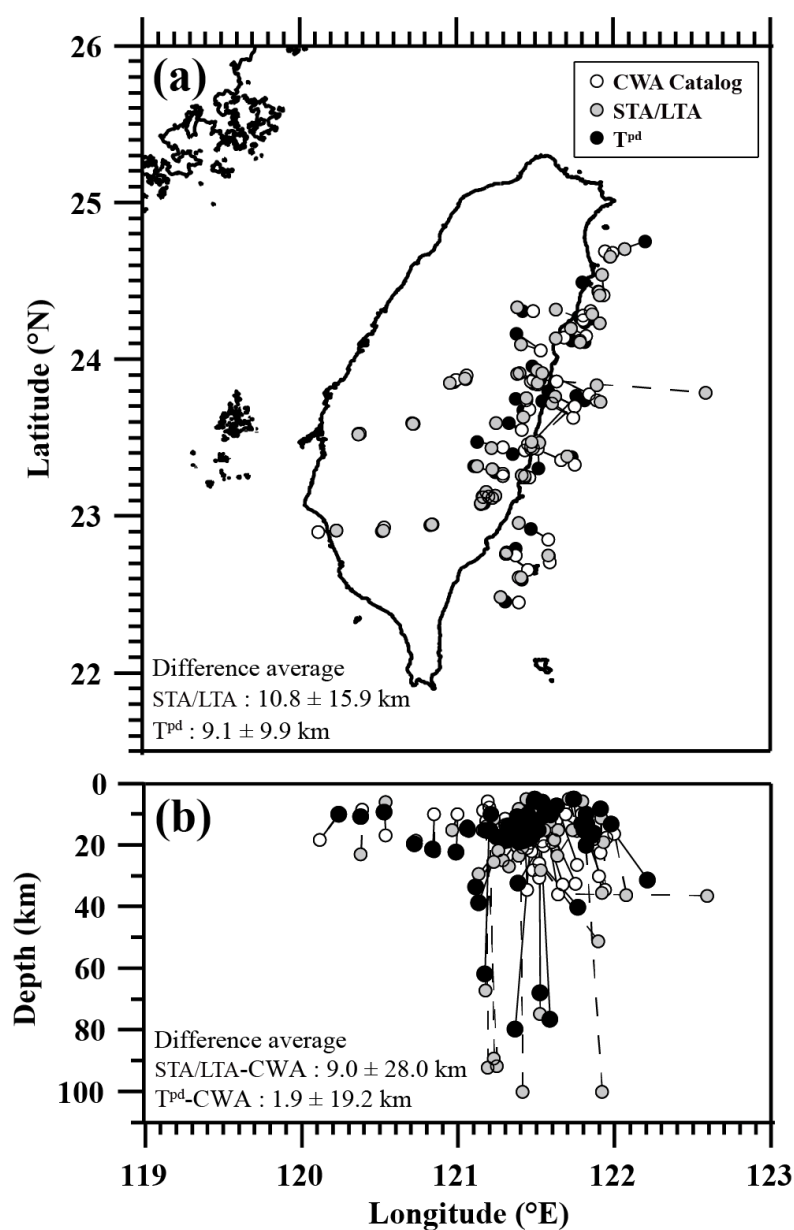
圖九、2022 年 9 月 18 日 12:43:00 至 12:45:00 多重地震事件測試結果分布圖。

根據前期結果，該模組確實開始能有效處理短時間內的多重事件，降低定位錯誤可能造成的地震規模誤判，進而減少誤報的可能。但通過目前測試，發現新定位模組對於到時資訊的關聯未臻穩定，仍會有事件分裂或混雜的情形出現。本研究近期發現若將被挑選權重門檻剔除的到時資訊納入考量，能有效降低事件分裂的情形。因此，本研究重新調整並撰寫了挑選資訊使用與否的邏輯，將剔除的到時資訊納入時空叢集計算，但同時排除於實際定位流程中，最終成功降低事件分裂的情形。仍有少數無法排除的分裂，根據目前產出的結果，這些分裂的事件可透過後期決策模組剔除。即便如此，本研究亦會持續嘗試在時空叢集、定位邏輯中，找出事件減少分裂的方法。

另外，如同前一段落所述，將強化 T^{pd} 法的挑選結果輸入既有定位模組後，在應用強化 T^{pd} 法的挑選模組後，整體處理速度能有所提升。雖然在時效及穩定性上獲得顯著的提升，但在定位精確度則未有顯著提升。觸發後三秒的定位結果仍

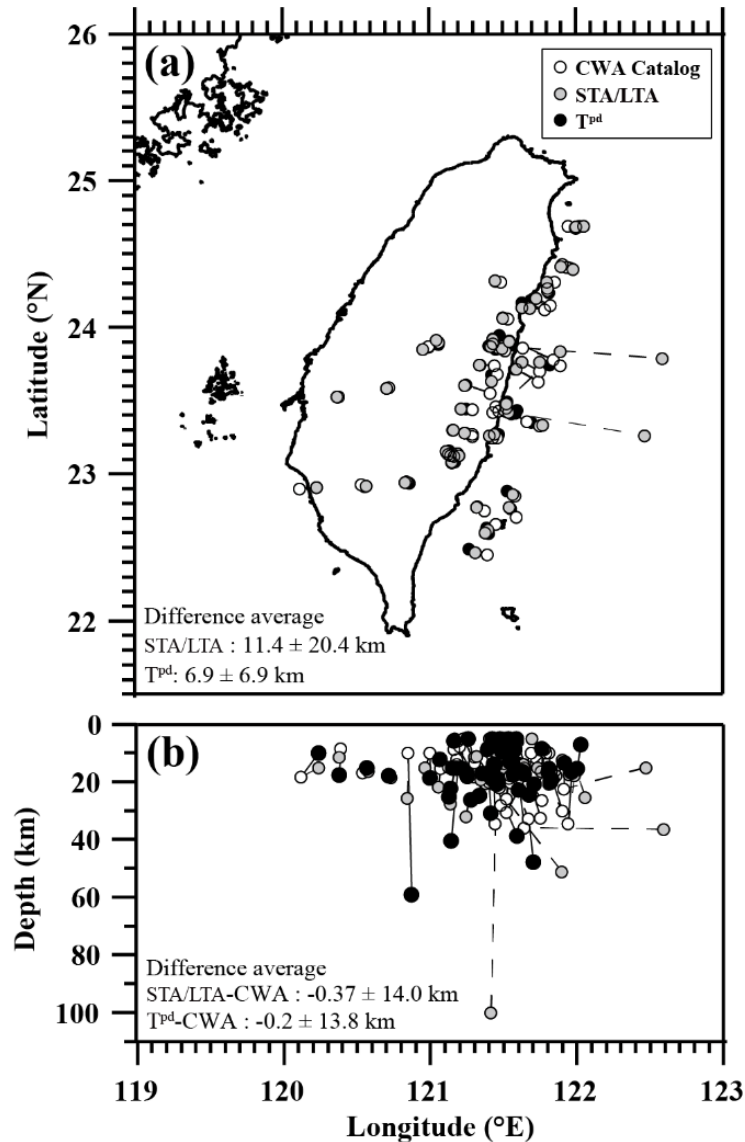
與前述既有系統相去不遠，這與前一段落對強化 T^{pd} 法與 STA/LTA 法挑選結果的比較相符，在系統觸發初期，觸發測站震央距仍小，兩種演算法之結果應相去不遠。因此，綜前所述，若要在觸發初期，有實質的定位精準度提升，未來勢必還要深入定位演算法，嘗試改進之。

然前一段落已比較過兩演算法時效性，下面將就穩定性深入分析。測試事件與前面相同，為表一中的 55 筆事件，測試結果如圖十、十一所示。圖十所示為第一報之統計結果，依目前系統設定第一報通常僅有 6 個挑選資訊，換言之，空餘角(Gap)都還大於 180 度。由於定位結果的不確定性仍高，直接使用第一報存有一定風險。因此，本研究使用與評估既有系統相同的門檻，採有效挑選資訊大於等於 12 的報告(圖十一)，並分析之。就顯示的數據，使用強化 T^{pd} 法產生的挑選資訊優於使用 STA/LTA 法的挑選資訊。強化 T^{pd} 法在水平方向上有 6.9 ± 6.9 公里的平均誤差，垂直方向上有 -0.2 ± 13.8 公里的平均誤差；STA/LTA 法在水平方向上則有 11.4 ± 20.4 公里的平均誤差，垂直方向上則有 -0.37 ± 14.0 公里的平均誤差。



圖十、CWA 地震報告與兩種挑選模組應用於新定位模組的第一報震央定位(a)、深度定位(b)比較圖。其中白點為 CWA 地震報告結果，灰點及黑點則分別代表新定位模組配合 STA/LTA 法、強化 T^{pd} 法的結果

顯而易見地，使用 STA/LTA 法結果較差，而其主要偏差來自於三個外海事件，這些事件的挑選資訊組合中有明顯的離群值。若將這三個事件剔除，其水平方向的平均誤差可以降到 6.7 ± 6.1 公里，垂直方向的平均誤差則是 -0.7 ± 13.7 公里，與強化 T^{pd} 法接近。至於時效的部分，利用強化 T^{pd} 法及 STA/LTA 法產出的平均處理時間(產出報告的時間-收到第一個挑選資訊的時間)分別為 2.78 ± 2.4 秒及 2.64 ± 1.7 秒，平均震後時間(產出報告的時間-計算的發震時間)則分別為 7.3 ± 2.5 秒及 9.8 ± 3.3 秒。若從第一報來看亦有相同的現象：兩者時效接近，定位準確度在剔除異常偏差事件後亦接近。如同前述對近震央區域的測站，兩演算法的結果接近，真正的差異在於整體系統的穩定性與其標準差，也就是挑選結果的穩定性。而這樣的差異最終影響了定位穩定與否。



圖十一、CWA 地震報告與兩種挑選模組應用於新定位模組，高於 12 個有效挑選資訊的震央定位(a)、深度定位(b)比較圖。其中白點為 CWA 地震報告結果，灰點及黑點則分別代表新定位模組配合 STA/LTA 法、強化 T^{pd} 法的結果。

肆、結論

- 一、建置強化 T^{pd} 法的挑選模組已趨近完成，透過歷史地震之測試也已驗證，在 P 波初達不明顯的情況下，與 STA/LTA 法相較，確實有更好的表現。在後續的模擬測試中，亦驗證了對 P 波較為靈敏，並不會造成系統困擾。以 2022 年 9 月 18 日芮氏規模 6.8 池上地震為例，強化 T^{pd} 法挑選結果較 STA/LTA 法集中。且強化 T^{pd} 法整體到時殘差平均值僅 0.6 秒，低於 STA/LTA 法的 1.1 秒，強化 T^{pd} 法的挑波效能明顯較優。
- 二、鑒於 Earthworm 平台資料共享及平行處理的概念，及考量到整體程式複雜度，本研究決定將規模評估相關運算與挑選模組分離，也將之從定位模組中分離，使各模組關注的事務更為單純，也讓後續調整更為容易。
- 三、在短時間內發生多重地震的狀況，會造成定位收斂困難使地震定位模組誤判。因此，本研究採理論流程分析，並建立相應程式。經模擬測試驗證，新定位模組確實能有效分辨短時間內的多重地震。且若加入被權重門檻剔除的到時資訊進行時空叢集，可以有效下降事件分裂的情形。剩餘無法排除的分裂，除透過後期決策模組剔除外，本研究仍會持續嘗試在時空叢集、定位邏輯中，找出降低分裂的方法。
- 四、新定位模組配合強化 T^{pd} 法挑選，其產出結果在水平方向平均誤差為 6.9 ± 6.9 公里，垂直方向則為 -0.2 ± 13.8 公里；平均處理時間為 2.78 ± 2.4 秒，平均震後時間則為 7.3 ± 2.5 秒。與 STA/LTA 法相較，強化 T^{pd} 法顯著提升了整體系統的定位穩定性。

參考文獻

- Chen, D. Y., N. C. Hsiao, and Y. M. Wu (2015). The Earthworm Based Earthquake Alarm Reporting System in Taiwan, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **105**, no. 2A, 568–579, doi: 10.1785/0120140147.
- Geiger, L. (1912). Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only, *Bull. St. Louis Univ.* **8**, no. 1, 56–71.
- Huang, T. C., and Y. M. Wu (2019). A Robust Algorithm for Automatic P-wave Arrival-Time Picking Based on the Local Extrema Scalogram, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **109**, no. 1, 413–423, doi: 10.1785/0120180127.
- Lee, W. H. K., and Y. M. Wu (2010). Earthquake Monitoring and Early Warning Systems in *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer-Verlag, New York, 2496–2530.
- Shin, T. C., and T. liang Teng (2001). An Overview of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **91**, no. 5, 895–913, doi: 10.1785/0120000738.
- Wu, Y. M. (2015). Progress on Development of an Earthquake Early Warning System Using Low-Cost Sensors, *Pure Appl. Geophys.* **172**, no. 9, 2343–2351, doi: 10.1007/s00024-014-0933-5.
- Wu, Y. M., D. Y. Chen, T. L. Lin, C. Y. Hsieh, T. L. Chin, W. Y. Chang, W. S. Li, and S. H. Ker (2013). A High-Density Seismic Network for Earthquake Early Warning in Taiwan Based on Low Cost Sensors, *Seismol. Res. Lett.* **84**, no. 6, 1048–1054, doi: 10.1785/0220130085.
- Wu, Y. M., J. K. Chung, and T. C. Shin (1999). Development of an Integrated Earthquake Early Warning System in Taiwan-Case for the Hualien Area Earthquakes, *Terr. Atmospheric Ocean. Sci.* **10**, no. 4, 719, doi: 10.3319/TAO.1999.10.4.719(T).
- Wu, Y. M., W. T. Liang, H. Mittal, W. A. Chao, C. H. Lin, B. S. Huang, and C. M. Lin (2016). Performance of a Low-Cost Earthquake Early Warning System (P-Alert) during the 2016 ML 6.4 Meinong (Taiwan) Earthquake, *Seismol. Res. Lett.* **87**, no. 5, 1050–1059, doi: 10.1785/0220160058.
- Wu, Y. M., H. Mittal, D. Y. Chen, T. Y. Hsu, and P. Y. Lin (2021). Earthquake Early Warning Systems in Taiwan: Current Status, *J. Geol. Soc. India* **97**, no. 12, 1525–1532, doi: 10.1007/s12594-021-1909-6.
- Wu, Y. M., H. Mittal, T. C. Huang, B. M. Yang, J. C. Jan, and S. K. Chen (2019). Performance of a Low-Cost Earthquake Early Warning System (P-Alert) and Shake Map Production during the 2018 Mw 6.4 Hualien, Taiwan, Earthquake, *Seismol. Res. Lett.* **90**, no. 1, 19–29, doi: 10.1785/0220180170.
- Yamada, M., and J. Mori (2022). P-wave picking for earthquake early warning: refinement of a Tpd method, *Geophys. J. Int.* **228**, no. 1, 387–395, doi: 10.1093/gji/ggab349.

- Yang, B. M., H. Mittal, and Y. M. Wu (2021). Real-Time Production of PGA, PGV, Intensity, and Sa Shakemaps Using Dense MEMS-Based Sensors in Taiwan 3, *Sensors* **21**, no. 3, 943, doi: 10.3390/s21030943.
- Zhang, J., Y. Tang, and H. Li (2017). STA/LTA Fractal Dimension Algorithm of Detecting the P-Wave Arrival, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **108**, no. 1, 230–237, doi: 10.1785/0120170099.

