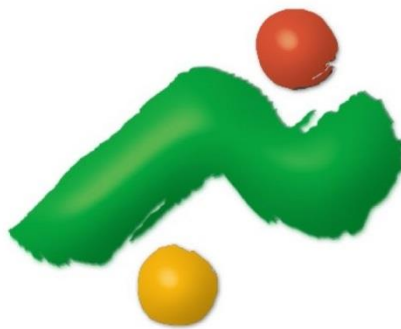


南投縣政府 110 年度研究報告

利用水準及 GPS 連續站資料解析台灣地表垂直 運動時空變化特性



服務單位：南投地政事務所
研究人員：曹禹心

中 華 民 國 1 1 0 年 3 月 1 7 日

南 投 縣 政 府 110 年 度 研 究 報 告 摘 要 表

研究報告名稱	利用水準及 GPS 連續站資料解析台灣地表垂直運動時空變化特性
研究單位 及人員	南投地政事務所 主稿人員：曹禹心
研究起迄年月	110 年 1 月至 110 年 3 月
研究緣起 與目的	因台灣本島處於菲律賓海板塊以及歐亞大陸板塊的交界處，故台灣屬於地表變化劇烈之地區，雖然台灣因此擁有豐富多變的地形，如高山、丘陵、台地...等，也因此造就了台灣多元的生態環境，但因板塊擠壓所造成的地震一直是台灣人民時時擔心的，尤其是台灣在這近 20 年發生不少死傷慘重的大地震，如 1999 年 9 月 21 日發生芮氏規模 7.6 的集集大地震以及 2016 年 2 月 6 日日發生芮氏規模 6.6 美濃大地震，此兩個地震更加凸顯出對全台灣地表進行整體監測有其必要而且也很重要，雖然現在無法對即將發生的地震進行預測，但只要一發生相當規模的地震，就會對台灣的地表變形、速度場造成不小的影響，如果能做出全台灣各地區不同地質與地震或者其他因素影響的相互關係圖，那會對我們評估整個台灣的地殼是如何變動非常有幫助。
研究範圍	本研究利用每年全台各地水準測線的高程值，進行速度場擬合解算，以得到全台灣的垂直速度場，而解算出來的擬合水準線會與當地的 GPS 連續站作相互比較，以確定擬合水準線的整體走勢是否正確以及是否可靠。有了台灣地區各段的重直速度場後，就能監測各條斷層與台灣地殼的交互關係，不僅能得到台灣近十幾年的地殼變化速率，

	也能對台灣各地區未來地殼可能發生的變化情形做潛在分析。
問題探討 與建議	就台灣東部地區而言，會影響地表的因素非常的多，所以要進行時間擬合序列的工作時，必須要考慮相當多因素進去，沒有人能確定何種原因會造成何種垂直速度場的改變，例如一個地震所造成的影響，就會讓整個時間序列擬合的過程完全不同，在進行時間序列擬合時，就必須分別對該地震事件的前後測線，分別做各自的最小二乘法，所以要藉由多次嘗試的方式，來找出最符合 gps 連續站變化情形的時間序列，然而東部的地形及地質又非常複雜，所以想得到真正正確的擬合曲線是非常困難的。 相比東部地區，台灣其他地區的時間擬合工作簡單非常的多，因為其他地形情況較為簡單且較固定，通常只有很大的地震，例如規模超過芮氏 6.0 的地震，會對時間擬合曲線造成影響，所以排除當地水準點位的問題的話，大部分的測線只要把大的地震加上去擬合，其垂直速度成果就會與 GPS 連續站的成果非常相似，因此通常只有在發生大地震時我們才需要去考慮其他地區（台灣北、西、南區），其整體的垂直速度場是否受到影響，以及擬合曲線是否需要改變。
選擇獎勵	☒ 行政獎勵 ☐ 獎勵金

利用水準及 GPS 連續站資料解析台灣地表垂直運動時空變化特性

目 錄

壹、摘要.....	5
貳、研究動機與目的	5
參、文獻回顧與探討	6
肆、研究方法及步驟	6
一、研究說明	6
二、實驗流程	8
三、台灣部分地區垂直速度場之推求.....	9
伍、全台地表速度場分析	16
陸、結論.....	20

利用水準及GPS連續站資料解析台灣地表垂直運動時空變化特性

壹、摘要

台灣處於造山運動變化劇烈之處，在台灣北方，菲律賓海板塊隱沒到歐亞大陸板塊之下，而在台灣西方，歐亞大陸隱沒到菲律賓海板塊之下，兩個方向皆產生了海溝以及島弧，因為板塊推擠加上斷層的特性，台灣的地形可以分為好幾區塊，其中如海岸山脈，就是由上述的菲律賓海板塊擠壓產生，而台灣的中央山脈則是由大陸板塊造山作用所產生，由此可知台灣各個地區的地質差異很大，如果能我們能利用台灣各地區的水準測線資料，找出其地表整體的變化情形那會非常有幫助的。

本研究利用每年全台各地水準測線的高程值，進行速度場擬合解算，以得到垂直速度場，而解算出來的擬合水準線會與當地的GPS連續站作相互比較，以確定擬合水準線的整體走勢是否正確以及是否可靠。有了台灣地區各段的重直速度場後，就能監測各條斷層與台灣地殼的交互關係，不僅能得到台灣近十幾年的地殼變化速率，也能對台灣各地區未來地殼可能發生的變化情形做潛在分析。

貳、研究動機與目的

因台灣本島處於菲律賓海板塊以及歐亞大陸板塊的交界處，故台灣屬於地表變化劇烈之地區，雖然台灣因此擁有豐富多變的地形，如高山、丘陵、台地...等，也因此造就了台灣多元的生態環境，但因板塊擠壓所造成的地震一直是台灣人民時時擔心的，尤其是台灣在這近 20 年發生不少死傷慘重的大地震，如 1999 年 9 月 21 日發生芮氏規模 7.6 的集集大地震以及 2016 年 2 月 6 日發生芮氏規模 6.6 美濃大地震，此兩個地震更加凸顯出對全台灣地表進行整體監測有其必要而且也很重要，雖然現在無法對即

將發生的地震進行預測，但只要一發生相當規模的地震，就會對台灣的地表變形、速度場造成不小的影響，如果能做出台灣各地區不同地質與地震或者其他因素影響的相互關係圖，那會對我們評估整個台灣的地殼是如何變動非常有幫助。

參、文獻回顧與探討

有學者採用GPS求出水平地表速度場[Yu et al., 1997]，並描述每年菲律賓海板塊都向歐亞板塊擠壓，而在我這次的研究中，也是利用GPS來求取速度場，但較不相同的是，我們利用的GPS資料不是平面的(x, y)，而是改採用垂直方向的GPS資料，雖然其資料精度相比平面較差，但如果利用長年觀測的GPS資料，其整體的資料會得到穩定的值，這時候就能利用GPS連續站的資料來做比對，如果做出來的垂直速度場時間序列，與GPS連續站的資料大致吻合，我們就能推出一結論，所做出來的時間序列擬合相較於其他時間序列較為正確。

肆、研究方法及步驟

一、研究說明

利用水準測線資料，把原始資料做解算以得到每年水準資料的高程值(level)，以得到每一年的高程差，並利用高程差資料進行各個區域的速度場解算，同時配合GPS連續站做監測，因為GPS連續站為長期的資料，故我們假定GPS的整體趨勢無誤，所以解算出來的速度場如與GPS連續站有差異，代表該次成果有錯誤，則需進行重複解算的步驟，直到兩者速度場趨勢相同為止。

在解算速度場時，我們必須要先設立一條水準測線中的一個點作為參考點，因為參考點的意義為把該點設為零點，以利算出該水準測線的其他點的相對值，而在第一年設立了一點為參考點，其餘每年的參考點都會相同，所以解算出結果的時間

序列會是一條水平的直線，而我們選定參考點的原則為，該測站點必須要是較為穩定不動的水準點，如果選用的測站點變動很大，因為誤差傳播得緣故，會造其他測線的成果呈現出不合理的跳動，所以在選用參考點時一般會每一點都去做測試，並選用其他測線時間序列跳動最小的結果。

由於GPS與水準參考點為不同的座標框架，所以想研究臺灣本島的垂直速度場，必須想辦法使兩者修正為同一情況下，這樣才有利於討論地表的垂直變形。雖然已經選好了參考點，但又因為台灣屬於地殼變動劇烈之區域，所以參考點本身還是會有不小的跳動，故要進行約制的工作，再進行約制時，我們會在測線上選定一距離GPS連續站最接近的測點作為約制點，因為其兩點距離最近，地殼在變動時此兩者所測得的結果通常會最接近，而選定的約制點會相對於澎湖的S01R白砂站，因為澎湖位置相對台灣本島而言，離歐亞板塊較為靠近，所以其測站的水準資料變動不會那麼激烈。另外還必須要使約制站的速率調整成與GPS連續站相同，這樣兩者才有辦法比對解算的成果是否有誤。

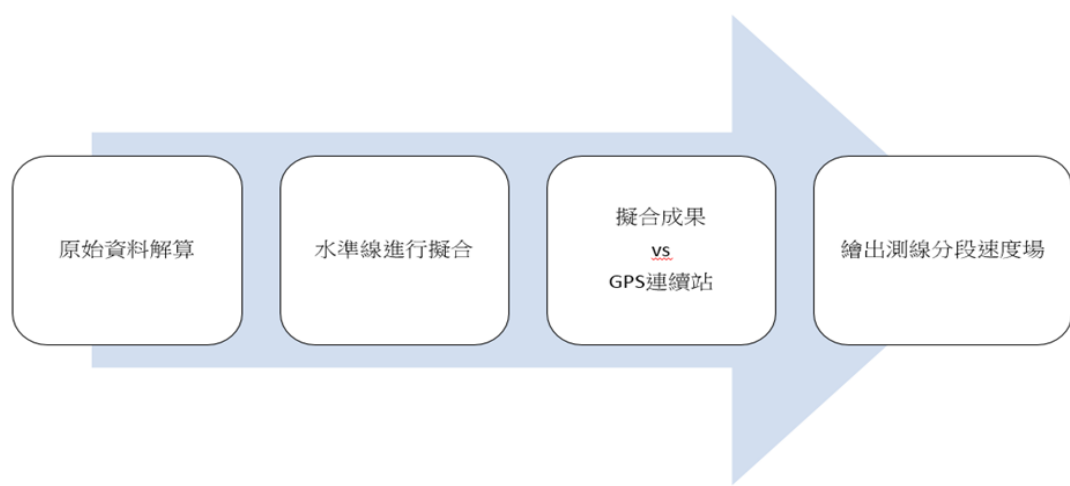
我們得到每年某一條測線高程差的結果後，就能把其斜率看做該區域的速度場，而一區域通常會分為好幾段不同的速度場，因為每年有大大小小不同的地震，有些年雖然有發生地震並且產生了位移，但震後的速度與震前相同，

而有些地震會有很劇烈的影響，如美濃大地震發生的那一年，我們可以在時間序列上看到很明顯的位移量，而且之後的速度場也很明顯不同；所以時間序列最主要的功能為，幫助我們判讀全台灣各個地區的地殼變化情形，以及未來的速度預期分析。

二、實驗流程

本計畫利用歷年水準測線資料，進行高程差以及速度場解算，同時搭配GPS連續站資料的結果來做分析，作業流程如下（圖片 1）。

1. 原始觀測資料解算:利用水準解算程式解算水準資料，並把每一年算出來的高程值做結合。
2. 把結合出來的高程值進行速度場解算，並同時畫出一條測線每一點每年的擬合水準線。
3. 判斷擬合水準線是否擬合成功，如擬合失敗重複第二步驟，直到擬合結果成功為止。
4. 將擬合的成果與GPS連續站的成果做比對，如不符合代表成果有誤，重複第二步驟直到成功為止。
5. 將擬合成功的水準線，利用GMT軟體畫出其整體的速度場變化，如有分段速度場則畫出所有分段的變化。



圖片 1：實驗流程圖

三、台灣部分地區垂直速度場之推求

[1] 跨車籠埔斷層之短測線

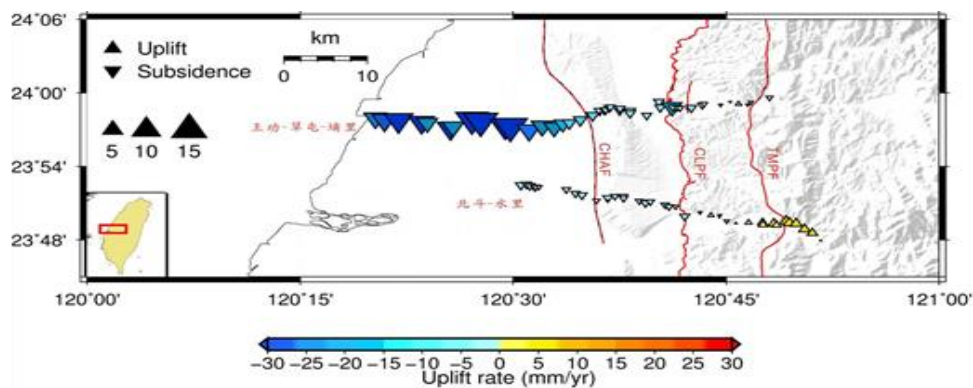
地調所自 2007 年起沿著車籠埔斷層設了 5 條水準線橫跨斷層，從北到南為五光至黃竹、曾厝至霧峰、北勢至峰谷、烏溪南岸及中興新村。2007 至 2017 年間共進行 10 次施測，而 2016 年僅施測五光至黃竹。根據圖片年高程差變化及垂直速度，此五條短測線這幾年沒有太大的變化。

[2] 王功至草屯及草屯至埔里測線

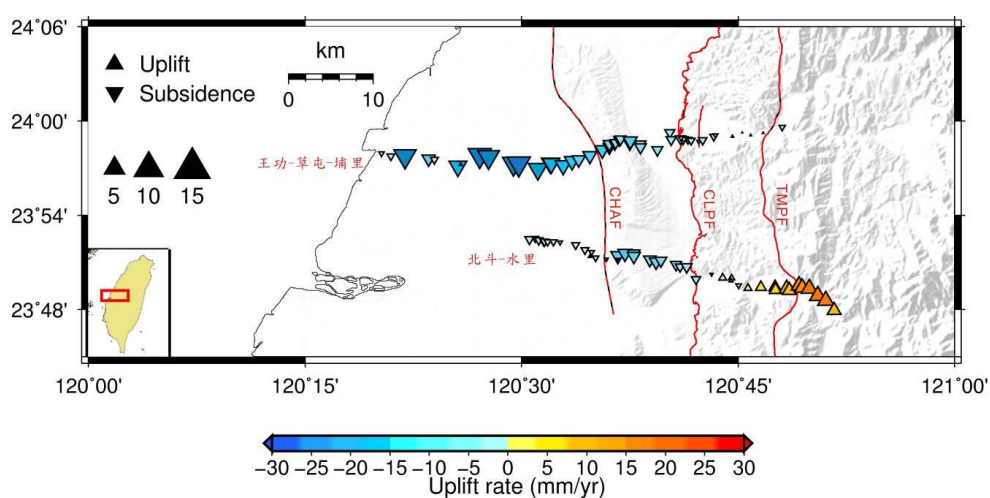
本測線通過彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，總長約 46 公里，2002 年至 2016 間共進行 13 次施測。並以 GPS 連續站 CAOT 之垂直速率做為約制點，校正 T075 相對 S01R 澎湖連續站的垂直速率（圖片 4）。

在 2013 年 3 月和 6 月南投各出現一次規模六以上地震，但在 2013 至 2014 年高程差沒有明顯差異；而通過車籠埔斷層從東至測線末端的水準點，同震量僅有 -4.5 mm 到 5.5 mm，故可說明 2013 年 2 次地震對本測線的影響，相對北斗到水里測線而言影響較小。故垂直速度場的擬合曲線在運行程式時，同時要考慮南投地震所造成的同震量。

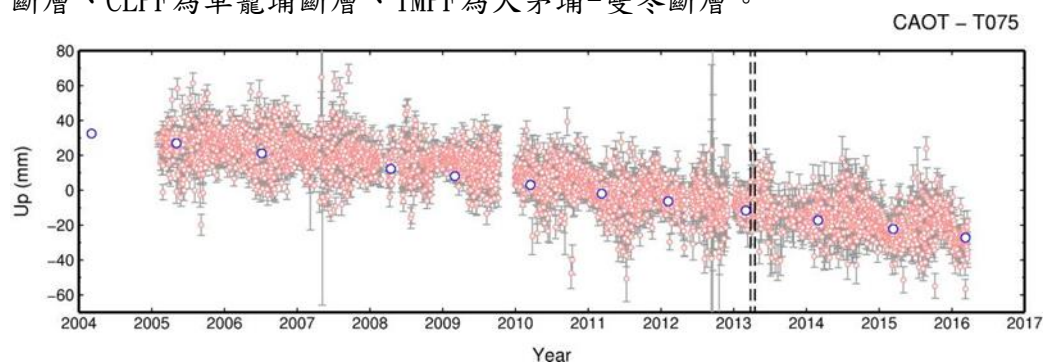
根據圖片 6，在彰化斷層西側（王功至員東國小區段）可明顯看出有地層下陷，沉降速率最大達到約 -55.0 mm/yr，其地表高程則沒有明顯起伏；彰化斷層以東跨車籠埔斷層至大茅埔-雙冬斷層一帶（八卦山山脈至雙冬國小），平均垂直速度大都在 -10.0 ~ 0.0 mm/yr，相較彰化斷層西側，雖然八卦山背斜地區高程較高，但其垂直速度改變相對不明顯。就結果而言，此測線西半部為地層下陷地區，而彰化斷層東側的垂直速度變化較小。



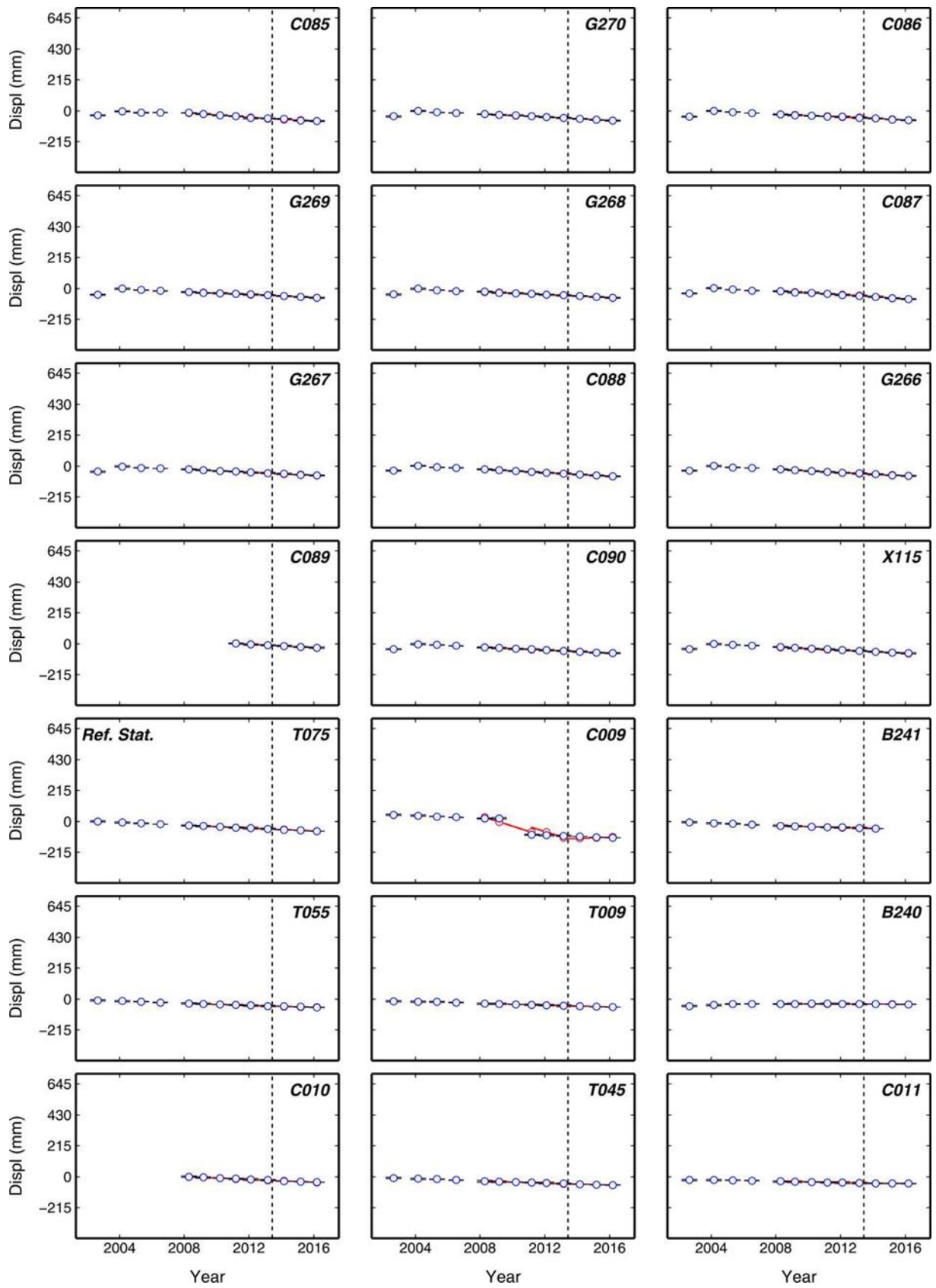
圖片 2：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震前）。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。



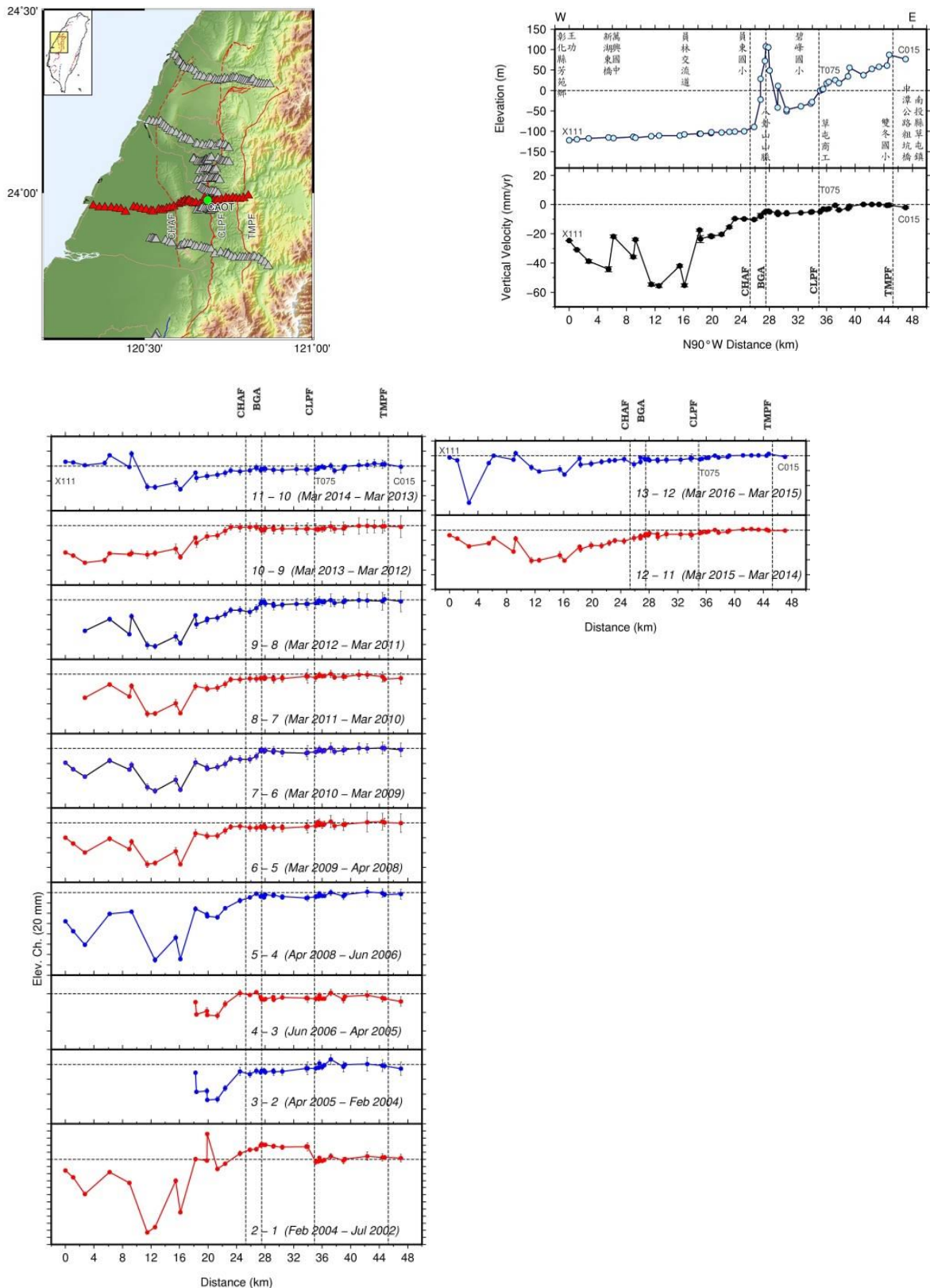
圖片 3：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震後至今）。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。



圖片 4：水準點位T075 與連續站CAOT之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。虛線為 2013 年南投地震。



圖片 5: 王功至草屯測線及草屯至埔里測線之時間序列。虛線為 2013 年南投地震。



圖片 6: 王功至草屯測線水準高程變化圖。最上面左圖為台灣中部地形，右圖為水準平均抬升速率。下圖為每個水準點每年的高程變化曲線，每刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線代表活

動斷層在地表出現的位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF為彰化斷層、BGA為八卦山背斜、CLPF為車籠埔斷層、TMPF為大茅埔—雙冬斷層。

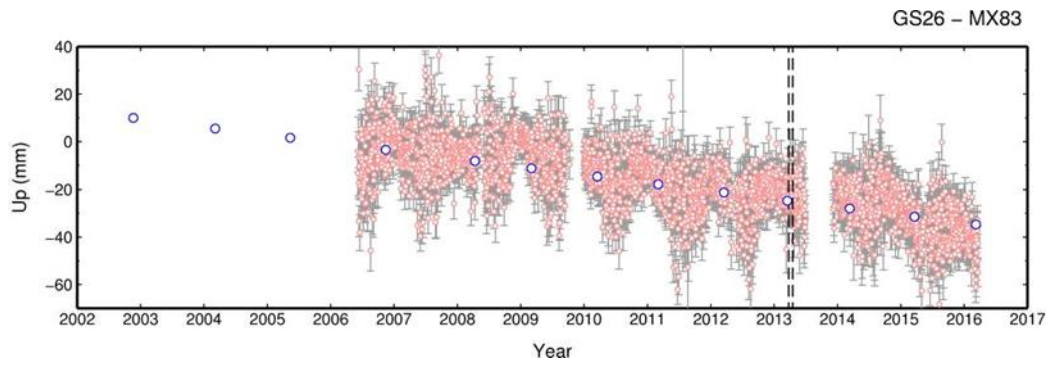
[3] 北斗至水里測線

本測線通過彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔—雙冬斷層，總長約 38 公里，2002 年至 2016 年共進行 13 次施測。並以GPS連續站GS26 之垂直速率做為約制點，相對S01R澎湖連續站的垂直速率（圖片 7）。

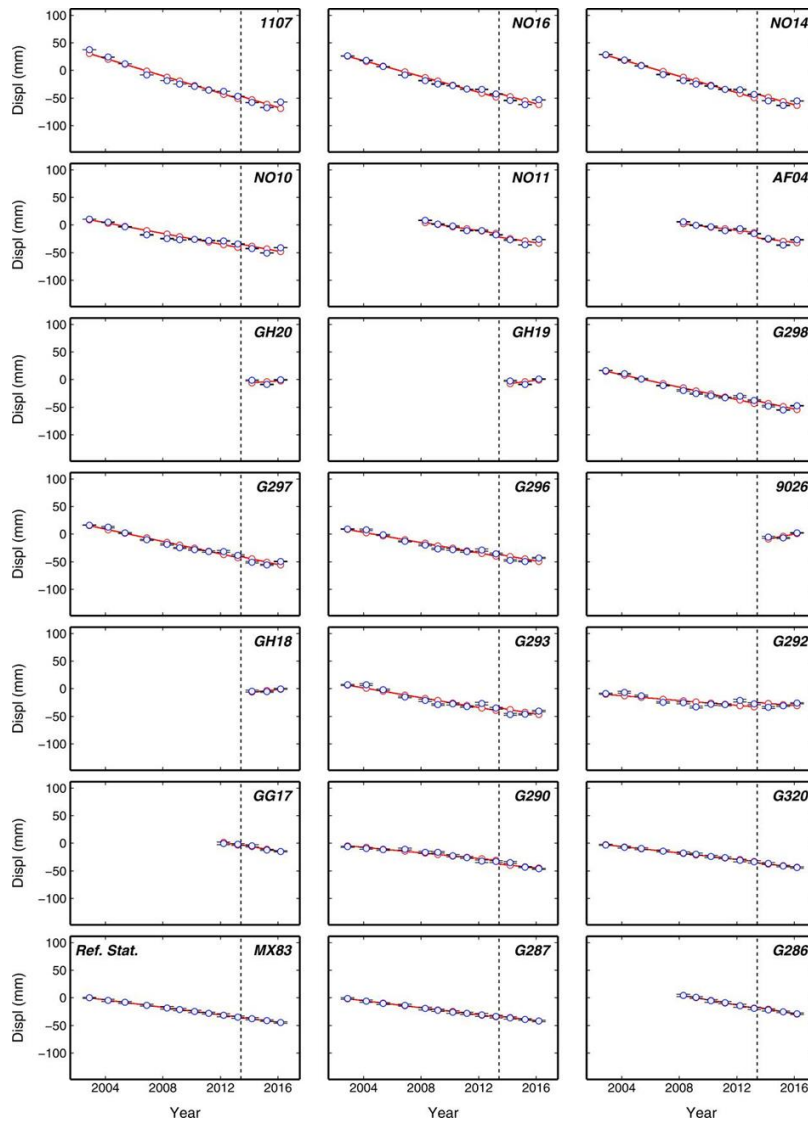
同上條測線所述，南投在 2013 年 3 和 6 月各發生一次大於規模六的地震，因此可看到水準線有 64.0 mm至 138.0 mm的同震量，所以 2013 至 2014 年在大茅埔—雙冬斷層上盤高程差有明顯的上升，最大值達到 85.0 mm。故垂直速度場的擬合曲線在運行程式時，也同時要考慮南投地震所造成的同震量。

根據圖片 9，彰化斷層西側垂直速度雖同樣為沉降，但沒有如同王功至埔里測線產生明顯的地層下陷。彰化斷層東側到赤水派出所區段，地表高程有顯著抬升，垂直速度變化則均為稍微下降。車籠埔斷層至大茅埔—雙冬斷層區段（名間國小至水里隧道），地表高程與垂直速度都為共同上升（約-7.0 ~ 10.0 mm/yr），而在大茅埔—雙冬斷層東側之區段，垂直上升速度從 10.0 mm/yr降至 3.5 mm/yr，此結果可能說明在集集地震後約 10 年，斷層滑移量還是集中在車籠埔斷層東側的滑脫面。

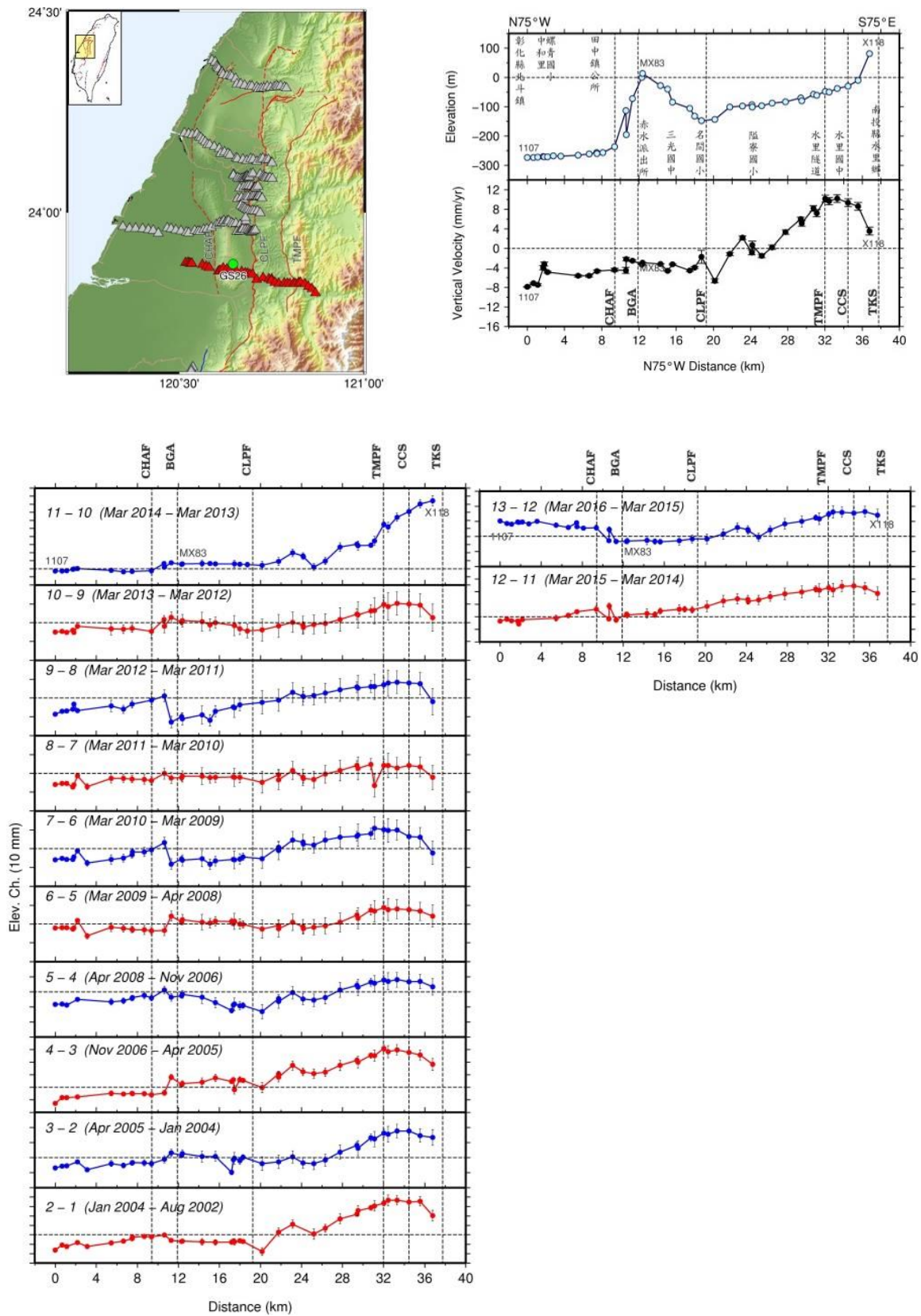
相對於本測線北方的王功至埔里測線，兩者西側的地層下陷和車籠埔斷層東側區段的地表抬升模式，皆有明顯的差異，故可說明在中興新村南北分段車籠埔斷層的運動型式並不相同。



圖片 7：水準點位MX83 與連續站GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年南投地震。



圖片 8：北斗至水里測線之時間序列。虛線為 2013 年南投地震。



圖片 9: 北斗至水里測線水準高程變化圖。最上面左圖為中部地形，右圖為水準平均抬升速

率。下圖為每個水準點每年的高程變化曲線，每刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線代表活動斷層在地表出現的位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面距離。CHAF 彰化斷層、BGA 八卦山背斜、CLPF 車籠埔斷層、TMPF 大茅埔—雙冬斷層、CCS 集集大山向斜、TKS 頂崁向斜。

伍、全台地表速度場分析

根據圖片 10 與圖片 11，台北地區的四條精密水準，都為淺藍色的小三角形，故可知為穩定沉陷。而桃園地區的精密水準，除了通過獅潭斷層有一點點的抬升，其餘水準點，比台北的三角形還更小。而新竹地區的兩條精密水準在通過斷層的垂直速度無顯著變化。苗栗地區的精密水準在在通過斷層的垂直速度也不顯著。

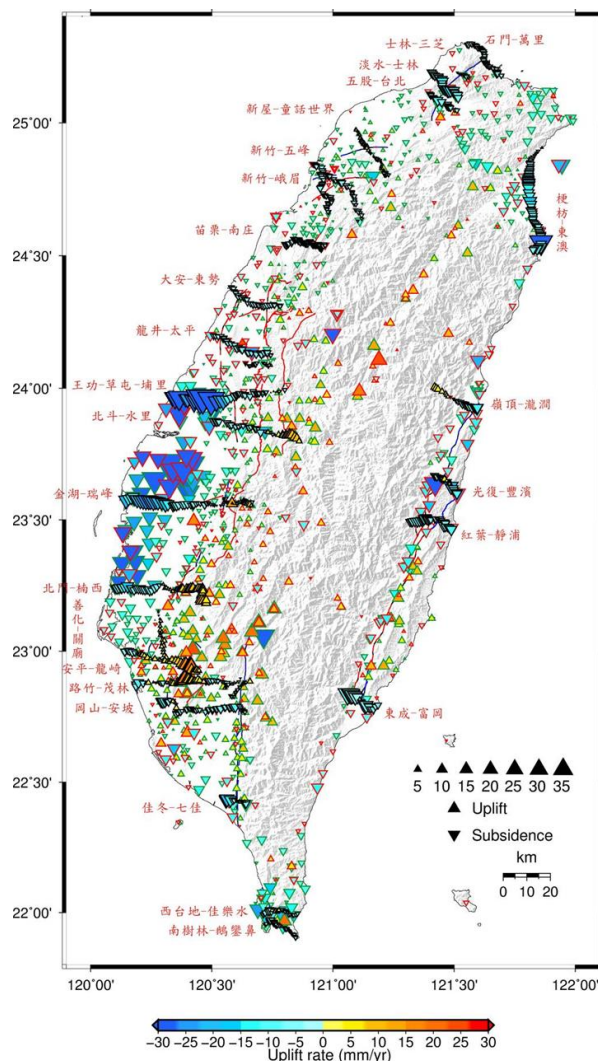
台中地區之兩條精密水準精密水準在在通過斷層的垂直速度同樣無明顯變化。彰化、南投地區的精密水準在沿海地區有很大的沉陷量最大達到 -40 mm/yr，而在南投山區最大達到約 10 mm/yr 的抬升速度。

而從圖片 10 可以很明顯看出，台灣西南部有很大的沉陷量（深藍色大三角形），台南地區的北門-楠西測線，同樣是沿海沉陷、山區抬升；善化-關廟測線除少數點位沉陷，其餘大多落在 0-4 mm/yr 之間；而安平-龍崎測線比較特別的是，在龍船斷層附近約有 20 mm/yr 的速度變化，而其原因有可能是背衝斷層、活動褶皺或是泥貫入體的影響所造成，因此和龍船斷層的具體關聯性，需要其他更多的地球物理觀測，如高精度之地震層析成像、地電、重力等，來協助解析。而高雄地區的路竹-茂林測線在龍船斷層同樣有 15 mm/yr 的抬升速度，因此可說明龍船斷層或許仍有活動。恆春半島測線的時間為 2010 至 2016 年，而恆春斷層東側有抬升的現象，速率大約 3 mm/yr。

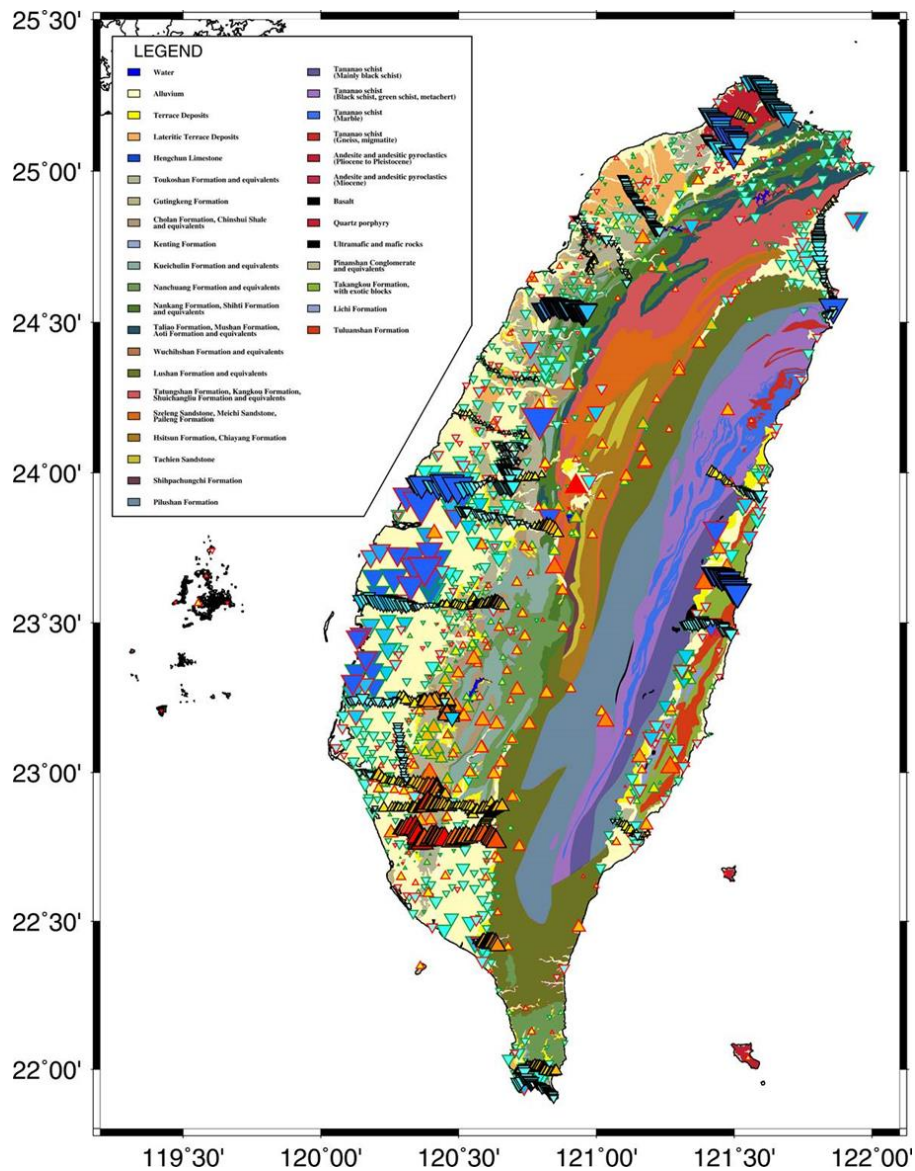
宜蘭地區的梗枋-東澳測線在頭城鎮至五結鄉區段，垂直速度最大達 -18 mm/yr，進入蘇花公路（蘇澳至東澳區段），垂直速度提升至 -10 mm/yr。花蓮地區的嶺頂-瀧澗測線垂直速度，由西側向東側遞減；紅葉-靜浦測線的垂直速度皆為沉降現象，。台東地區的東成-

富岡測線垂直速度在利吉斷層西側為抬升，利吉斷層東側為沉降。

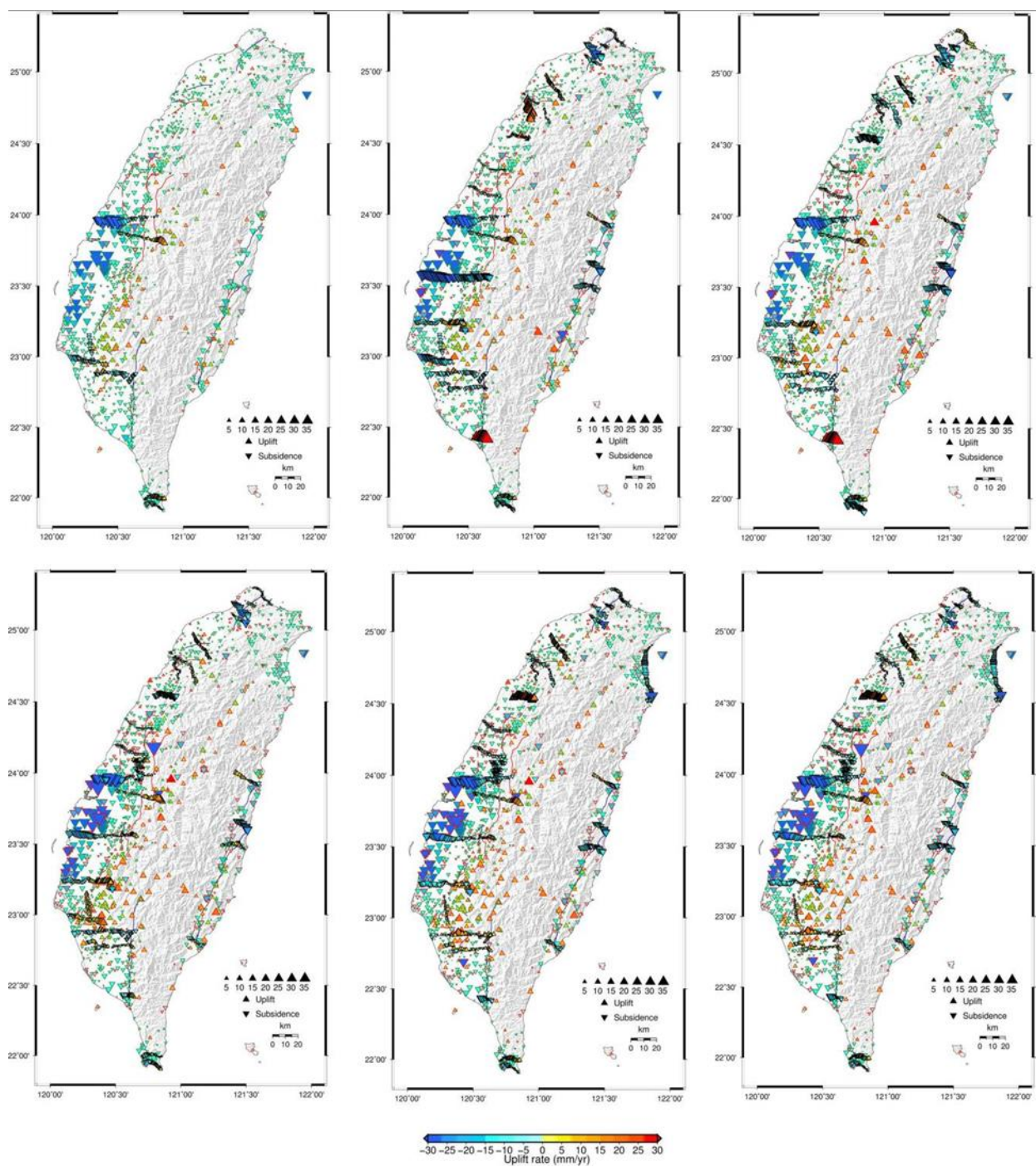
我們可發現觀測期間所發生之主要地震(瑞氏規模大的地震而且距離地表近)，會影響地表垂直速度場變化情形，所以把 2003 年成功地震、2006 年卑南地震、2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震、2016 年美濃地震，分為六個時間段分別解算其速度場，結果如圖片 12。



圖片 10: 2002 年至 2016 年全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示連續站、紅色邊框表示移動站。



圖片 11: 全臺地質圖及 2002 年至 2016 年垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示連續站、紅色邊框表示移動站。



圖片 12: 2003 年至 2016 年全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示連續站、紅色邊框表示移動站。

陸、結論

就台灣東部地區而言，會影響地表的因素非常的多，所以要進行時間擬合序列的工作時，必須要考慮相當多因素進去，沒有人能確定何種原因會造成何種垂直速度場的改變，例如一個地震所造成的影響，就會讓整個時間序列擬合的過程完全不同，在進行時間序列擬合時，就必須分別對該地震事件的前後測線，分別做各自的最小二乘法，所以要藉由多次嘗試的方式，來找出最符合gps連續站變化情形的時間序列，然而東部的地形及地質又非常複雜，所以想得到真正正確的擬合曲線是非常困難的。

相比東部地區，台灣其他地區的時間擬合工作簡單非常的多，因為其他地形情況較為簡單且較固定，通常只有很大的地震，例如規模超過芮氏 6.0 的地震，會對時間擬合曲線造成影響，所以排除當地水準點位的問題的話，大部分的測線只要把大的地震加上去擬合，其垂直速度成果就會與GPS連續站的成果非常相似，因此通常只有在發生大地震時我們才需要去考慮其他地區(台灣北、西、南區)，其整體的垂直速度場是否受到影響，以及擬合曲線是否需要改變。