

以 GPS 天頂向總延遲量預估大豪雨之可行性評估

曾子榜^[1] 蕭宇伸^{[2]*} 曾莉鈞^[2]

摘 要 本研究分析全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 資料所計算之天頂向總延遲量 (Zenith Total Delay, ZTD) 與降雨之相關性, 並評估此方法應用於預報大豪雨之可行性。本研究選擇 2015 年 8 月蘇迪勒颱風及 9 月杜鵑颱風作為研究案例, 利用 Bernese 5.2 軟體以精密單點定位法 (Point Precise Positioning, PPP) 將 17 個 GPS 地面站資料分別計算出颱風期間內之 ZTD 結果, 並與二次差分相對定位 (Double-Differencing; DD) 所計算之 ZTD 結果進行比較。本研究亦蒐集颱風期間內中央氣象局雨量站實際降雨資料來分析 ZTD 與降雨之關聯性。本研究嘗試使用互相關法及 ZTD 斜率法, 分別進行大豪雨預報的可行性評估。研究顯示, 互相關法成果不如預期, 無法使用在預測大豪雨上; ZTD 斜率法皆能在兩颱風案例中, 優先於大雨發生前, 斜率上有較明顯之變動, 因此其未來運用在預測大豪雨上具有潛力。

關鍵詞: 全球定位系統、天頂向總延遲量、大豪雨預報。

Feasibility Assessment of Heavy Rainfall Forecasting using Global Positioning System-Derived Zenith Total Delays

Tzu-Pang Tseng^[1] Yu-Shen Hsiao^{[2]*} Li-Chun Tseng^[2]

ABSTRACT This study examined the correlation between rainfall and zenith total delays (ZTDs), which are derived from the global positioning system (GPS). Furthermore, this study analyzed feasibility assessment of heavy rainfall forecasting using GPS-derived ZTDs during typhoons. Typhoon Soudelor (in August, 2015) and Typhoon Dujuan (in September, 2015) were selected as the study cases. We used the point precise positioning (PPP) method with Bernese 5.2 software to compute ZTDs at 17 GPS stations during the study periods. The ZTD results derived from the PPP method were compared with those derived from the double-differencing method. We also collected rainfall data from the rainfall stations of the Central Weather Bureau in Taiwan and analyzed correlations between the ZTDs and rainfall at these selected GPS rainfall stations. The cross-correlation method and ZTD-derived slope were used to assess the feasibility of heavy rainfall forecasting. Our results indicated that the cross-correlation method is unfeasible for heavy rainfall forecasting during typhoons. The results of the ZTD-derived slope indicated an obvious ZTD peak (extreme value) before heavy rainfall at each station during the two typhoon events. Therefore, using GPS-derived ZTD for heavy rainfall forecasting has great potential for future application.

Key words: Global positioning system, zenith total delay, heavy rainfall forecasting.

一、前 言

台灣夏季常受到颱風的侵擾, 所帶來之雨量提供了台灣重要的水資源, 然而在短時間內降下大雨, 易造成災害之發生, 例如: 土石流、水災等。如果可以提早預估出降雨發生時間, 不僅能即時做出適當之應對措施, 亦能將災害降至最低。全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 於現今生活中普遍被應用, 例如: 導航、定位等。GPS 衛星資料因為受大氣、水氣等影響, 使得 GPS 訊號通過大氣層時, 速度比真空中慢且傳播路徑並非直線, 訊號於對流層與電離層中會出現延遲, 而

天頂方向之光學延遲量即為天頂向總延遲量 (Zenith Total Delay, ZTD)(蔡雅婷與洪景山, 2012)。ZTD 之組成可以分為兩種—乾延遲 (zenith hydrostatic delay, ZHD)、濕延遲 (zenith wet delay, ZWD), 由於 ZHD 受乾空氣的溫度、壓力變化影響改變其折射率, ZWD 則是因為水蒸氣分佈不均勻導致訊號折射, 其值在天頂方向約 1 到 60 公分 (葉大綱等, 2017; 楊名, 2010)。ZTD 為 ZWD 與 ZHD 之總和 ($ZTD=ZWD+ZHD$) (Hordyniec, 2014), 一般而言 ZHD 趨於穩定且變動較小, 故造成 ZTD 變化之主要因素為 ZWD 變化。在過去數年之中, 已有不少文獻分析 ZWD 或 ZTD 與大氣含水量的關係, 例如彭微之 (2010)、蔡雅婷與洪景山 (2012)、葉大綱等 (2017)、Yeh

[1] 澳洲地球科學中心

Geoscience Australia, Cnr Jerrabomberra Ave. and Hindmarsh Drive, Symonston ACT 2609, Australia

[2] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: yshsiao@nchu.edu.tw

et al (2014, 2015, 2016)，並獲得不錯的成果。但在過去的研究中，均著重於 ZWD 或 ZTD 與大氣含水量之關係，而 ZWD 或 ZTD 與強降雨之關聯性則較少，目前僅 (彭微之，2010) 利用 ZWD 與降雨資料進行小波轉換和互相關法分析，發現於颱風及梅雨期間時間延遲大約 2 至 7 小時。本文乃針對 ZTD 與颱風強降雨之關係，做一全盤性的分析，並分析其應用於強降雨

預報之可行性。本研究以 2015 年 8 月蘇迪勒颱風 (typhoon Soudelor) 及 2015 年 9 月杜鵑颱風 (typhoon Dujuan) 為研究案例，透過中央氣象局 GPS 測站資料演算出 ZTD，並配合中央氣象局雨量站資料，使用互相關法與 ZTD 斜率法分析 ZTD 應用於預測降雨時間之可行性，希望本文相關研究成果能提供氣象預報技術之參考。本研究流程圖如圖 1 所示。

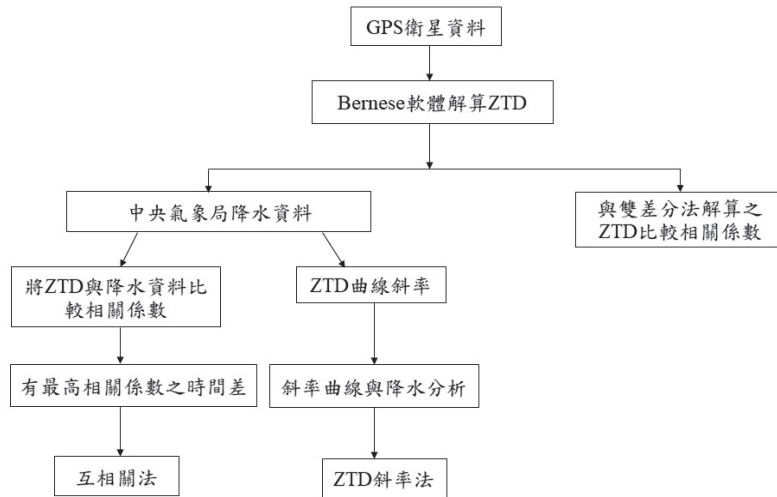


圖 1 研究流程圖

Fig.1 The flow chart of this study

二、研究方法

1. 研究資料

本研究蒐集蘇迪勒颱風侵台前後期間 2015 年 8 月 5 日 9 時至 2015 年 8 月 12 日 24 時，以及杜鵑颱風侵台前後期間 2015 年 9 月 25 日 9 時至 2015 年 10 月 2 日 24 時共 17 個中央氣象局 GPS 觀測站資料，來進行相關研究。圖 2 為此 17 個 GPS 觀測站之分布圖，分別為板橋 BANC、林口 LNKO、坪林 PLIN、福隆 FLON、新竹 HSIN、關西 KSHI、通霄 TSIO、神岡 SGUN、新社 NSHE、霧峰 WFEN、佳陽 JYAN、花蓮 HUAL、玉山 YUSN、南科 NANK、鹿野 LONT、三地門 SAND、小港 SGAN 等。這 17 個測站地理位置分布平均，且從平原至高山之測站皆有，故極具代表性。其實全台中央氣象局 GPS 觀測站總共有 129 個，而本研究選擇此 17 個測站之原因有二，第一：這 17 個 GPS 站雖然無雨量資料，但於方圓 8 公里以內都有中央氣象局之雨量站，故氣象局雨量站之雨量資料應能代表此 GPS 觀測站位置之雨量；第二：此 17 個 GPS 觀測站於 GPS 精密求定大氣可降水及服務網 (<http://120.126.139.90:8080>) 中，有提供二次差分相對定位 (Double-Differencing, DD) 解算之 ZTD 資料，故可與本文採用之精密單點定位法 (Point Precise Positioning, PPP) 所計算之 ZTD 結果進行比較。本研究氣象局雨量站資料來源為中央氣象局觀測資料查詢系統 CODiS(2017) 所蒐集。除此之外，蘇迪勒颱風與杜鵑颱風其路徑非常相似 (如圖 3)，於太平洋海域形成後，一路向西北方行進，皆從台灣東岸太魯閣一帶登陸，並於台灣西部濁水溪出海口一帶離開，由於這兩個颱風登陸時間、路徑、強度、災損程

度等都很一致，故過去相關研究中皆常被提出且進行比較，因此本研究於案例選擇上，將蘇迪勒颱風與杜鵑颱風作為研究對象。

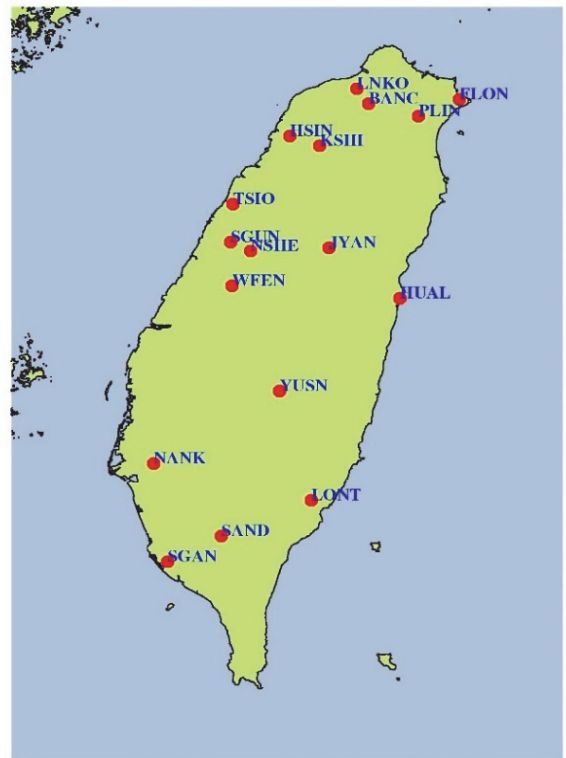


圖 2 本研究之 17 個 GPS 測站圖

Fig.2 The 17 GPS stations of the study areas

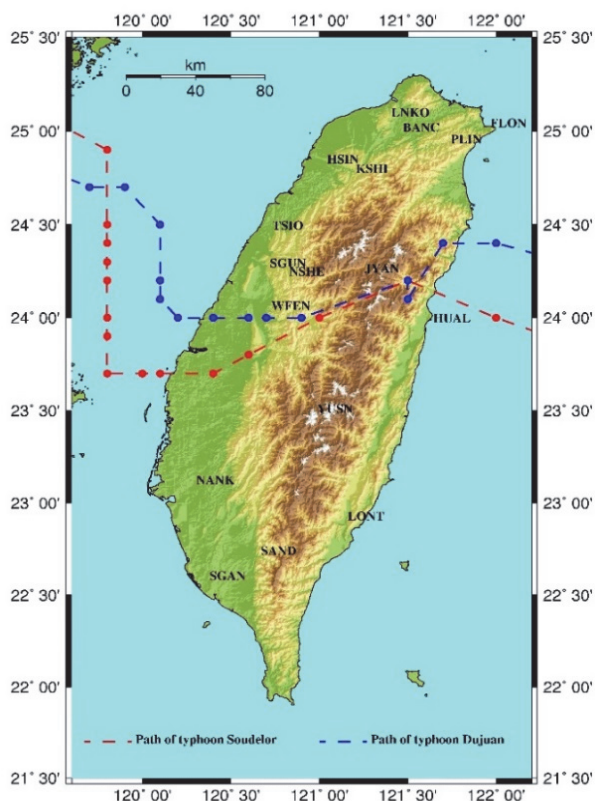


圖 3 蘇迪勒颱風及杜鵑颱風經過台灣詳細路徑圖

Fig.3 The detailed paths of Typhoon Soudelor and Typhoon Dujuan

本研究利用 Bernese 5.2 軟體 (Dach et al., 2015) 進行 ZTD 解算, 於 Bernese 軟體中輸入 GPS 觀測資料原始檔、精密星曆、地球自轉參數等, 並配合 Bernese 5.2 軟體中各項功能, 將所需要之 ZTD 計算出。前人研究中 (陳彥秋等, 2008), 利用水氣微波輻射儀 (Water Vapor Radiometer, WVR) 驗證 GPS 技術所反演出之 ZTD, 標準差可達 10-23 mm 等級。

2. 研究方法介紹

(1) PPP 法解算之 ZTD 與 DD 法解算之 ZTD 相關性比較

GPS 相對定位易受到基線長度之影響, 因此其定位隨著基線之增長也有較多不確定性 (陳國華等, 2009), 相對定位中之 DD 法, 包含空中一次差分與地面一次差分, 最少需要兩部接收儀, 是普遍被應用的定位方法之

一, 但由於在實務上, DD 法需組成衛星與地面站二次差分觀測量, 而且必須搜尋整數週波未定值, 而 PPP 法主要利用未差分觀測量, 在週波未定值求解上則直接視為浮動解, 因此精密單點定位求解的時間上較為有效率。故整體而言, DD 法其所需時間較 PPP 長, 對於本研究運用在預測大豪雨而言無法即時提供 GPS 定位資料, 並且 PPP 只需一部接收儀蒐集 GPS 衛星觀測量即可進行定位工作 (林老生, 2009), 因此本研究選擇使用 PPP 定位方法。

PPP 法因為無法互相消去系統誤差, 因此需透過 Bernese FTP 網站上提供之精密星曆、時錶差資料來消除衛星軌道與衛星時錶誤差, 而電離層誤差能透過雙頻 GPS 觀測量組成 L3(無電離層線性組合) 及全球電離層圖之全電子含量 (the Global Ionospheric Maps of Total Electron Content) 來消除 (Yeh et al., 2015)。本文乃利用 PPP 法, 配合 Bernese 5.2 軟體解算 17 個 GPS 觀測站之 ZTD 成果, 並與傳統採用 DD 法解算之 ZTD 成果進行相關係數分析。本研究採用 DD 法解算 ZTD 之成果資料是從 <http://120.126.139.90:8080> 網頁下載得到, 其資料為美國大氣科學研究大學聯盟 (University Corporation for Atmospheric Research, UCAR) 所之成果。

(2) 以互相關法進行大雨發生時間之預測

利用 PPP 法解算出 17 個 GPS 測站於蘇迪勒颱風和杜鵑颱風襲台期間之 ZTD 值後, 與同時鄰近雨量站之降雨資料進行相關性分析。相關性分析即計算 ZTD 值與雨量的相關係數。然而若只分析 ZTD 值與雨量相關係數, 並無法得知 ZTD 值是否能應用於降雨量之預測, 故本研究相關性分析之方法為互相關法, 即比較 ZTD 不同時間序列與雨量之各種相關係數值。在實作上即固定 ZTD 區間並與延後數小時或提前數小時之降雨資料做相關係數之分析, 並且求出各種相關係數值之最大值 (如圖 4)。此相關係數最大值所對應的 ZTD 與降雨資料之調整時間差若為提前, 即代表該測站之 ZTD 值有潛力來預報該地區之降大豪雨時間。例如當某一測站在提前 m 小時之 ZTD 值與降雨資料有相關係數最大值時, 此 m 值 (小時) 即可做為大豪雨來臨前之提前預測時間。

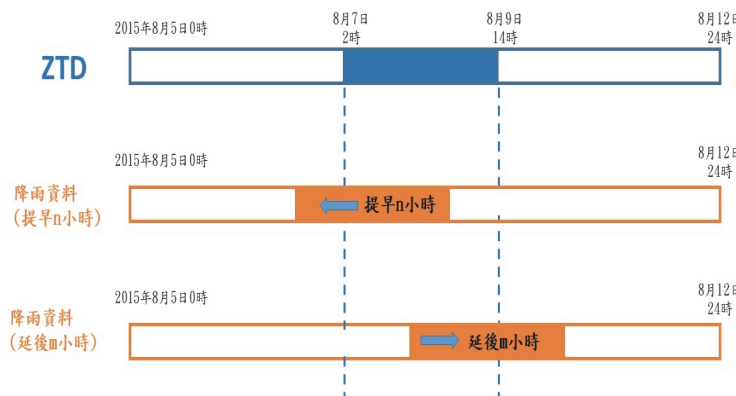


圖 4 互相關法示意圖

Fig.4 The illustration of cross-correlation method

(3) 以 ZTD 斜率法進行大雨發生時間之預測

除了互相關法之外，本文進一步研究 ZTD 值變化率是否能作為大豪雨來臨預報之參考，故提出另一個相關性分析之方法，稱為 ZTD 斜率法，即計算 ZTD 之斜率值，並將其值與同時間實際降雨資料進行相關性分析。ZTD 斜率計算方法如 (1) 式所示。

$$\text{ZTD 斜率} = \left| \frac{(\text{第 } n+5 \text{ 小時 ZTD 值} - \text{第 } n \text{ 小時 ZTD 值})}{5} \right| \quad (1)$$

本研究所利用之斜率是將第 n 小時 ZTD 值與相距五小時之 ZTD 值，計算其斜率，選擇 5 小時之原因是由於 ZTD 於每個小時都有一定的震盪，並非規律的情況，為消除此一雜訊，故(1)式中以 5 小時為單位。

三、結果與討論

1. PPP 法與 DD 法解算 ZTD 成果比較

表 1 為本研究採用 PPP 法與 UCAR 採用 DD 法解算之 ZTD 值，在蘇迪勒颱風事件中 (2015 年 8 月 5 日 9 時至 2015 年 8 月 12 日 24 時) 之相關係數統計值，結果顯示 PPP 法與 DD 法解算之 ZTD 相關係數值在這 17 個測站中均相當高，平均相關係數高達 0.9367。表 2 為 PPP 法與 DD 法解算之 ZTD 值，在杜鵑颱風事件中 (2015 年 9 月 25 日 9 時至 10 月 2 日 24 時) 之相關係數統計值，結果顯示兩種解算法得到之 ZTD 依然擁有高相關，平均相關係數也高達 0.9049，故由表 1 與表 2 可發現，本研究所採用的 PPP 法解算之 ZTD 值，其成果與傳統普遍使用的 DD 法之成果，十分接近，故利用 PPP 法來計算 ZTD 值應具可信度，而且 PPP 法所需的計算時間較 DD 法更短，極具優勢。圖 5 為板橋、南科及霧峰等 GPS 站於蘇迪勒及杜鵑颱風期間 ZTD 計算成果圖，由於 GPS 測站高達 17 個，故圖 5 僅挑選此三站作為代表。圖 5 中橫軸為時間軸，0~200 小時即代表蘇迪勒颱風中 2015 年 8 月 5 日 9 時至 2015 年 8 月 12 日 24 時，與杜鵑颱風中 2015 年 9 月 25 日 9 時至 10 月 2 日 24 時，每一小時一筆資料。由圖 5 可發現，本研究計算之 ZTD(藍線)、DD 法之 ZTD(紅線) 範圍均介於 2.5 公尺~2.7 公尺之間，且兩者整體趨勢相符合，可以再次證實本研究 PPP 法所計算之 ZTD 有可信度，故採用 PPP 法解算 ZTD 不僅可以減少計算時所花費的時間與人力成本，亦可提供更快速、更有效率之方法進行後續預測降雨之流程與作業。

2. 互相關法之成果

表 3 與表 4 顯示蘇迪勒與杜鵑兩個颱風事件中，17 個測站之 ZTD 值與實際降水量之間的相關係數最大值，與出現相關係數最大值時候的時間差距 (時間延遲)，所有 ZTD 值與實際降水量皆經過 GMT 之高斯濾波處理，罩窗半徑為 5 小時。而圖 6 則顯示互相關法中，各 GPS 測站在最高相關係數時的時間延遲量。由於中央氣象局提供之鄉鎮預報為 3 小時更新一次，並且以 3 小時為一單位 (於中央氣象局網站上公告時間 00:00、03:00、06:00 等之降雨機率、相對溼度等相關資訊)，因此圖 6 中出現相關係數最大值之時間差在±3 小時內者，本研究將其標示為黑色點，代表 ZTD 值與降雨延遲較少，此狀

況屬於 ZTD 值不能作為預報使用，故無法提供民眾充分時間進行防災工作；若出現相關係數最大值之時間差小於-3 小時者，本研究將其標示為藍色點，顏色越偏淺藍者代表時間差越小，代表 ZTD 值與前些時段之降雨比較吻合，亦屬於不能作為預報使用；若出現相關係數最大值之時間差大於 3 小時者，顯示為紅色點，本研究可以利用 ZTD 之最高峰來推算出大雨發生時間，是屬於可做為預測者。各測站相關統計表如表 4 所示。

表 1 PPP 法與 DD 法解算的 ZTD 值之間的相關係數 (蘇迪勒颱風事件)。

Table 1 Correlation coefficients between ZTD values solved by PPP method and DD method (Typhoon Soudelor event).

編號	站名	相關係數
1	板橋BANC	0.952
2	玉山YUSN	0.890
3	佳陽JYAN	0.959
4	福隆FLON	0.935
5	新竹HSIN	0.965
6	花蓮HUAL	0.939
7	關西KSHI	0.940
8	林口LNKO	0.954
9	鹿野LONT	0.921
10	坪林PLIN	0.914
11	三地門SAND	0.943
12	通霄TSIO	0.922
13	新社NSHE	0.930
14	霧峰WFEN	0.943
15	南科NANK	0.937
16	小港SGAN	0.943
17	神岡SGUN	0.937

表 2 PPP 法與 DD 法解算的 ZTD 值之間的相關係數 (杜鵑颱風事件)。

Table 2 Correlation coefficients between ZTD values solved by PPP method and DD method (Typhoon Dujuan event).

編號	站名	相關係數
1	板橋BANC	0.900
2	玉山YUSN	0.875
3	佳陽JYAN	0.878
4	福隆FLON	0.923
5	新竹HSIN	0.952
6	花蓮HUAL	0.954
7	關西KSHI	0.924
8	林口LNKO	0.836
9	鹿野LONT	0.934
10	坪林PLIN	0.863
11	三地門SAND	0.909
12	通霄TSIO	0.906
13	新社NSHE	0.916
14	霧峰WFEN	0.930
15	南科NANK	0.824
16	小港SGAN	0.912
17	神岡SGUN	0.948

表 3 各測站之時間差與相關係數最大值 (蘇迪勒颱風事件)。

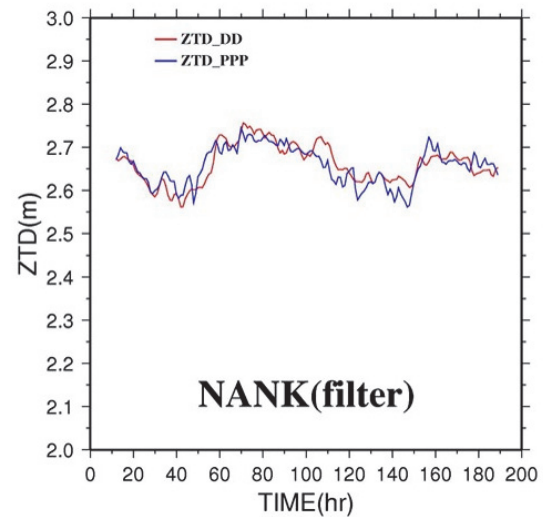
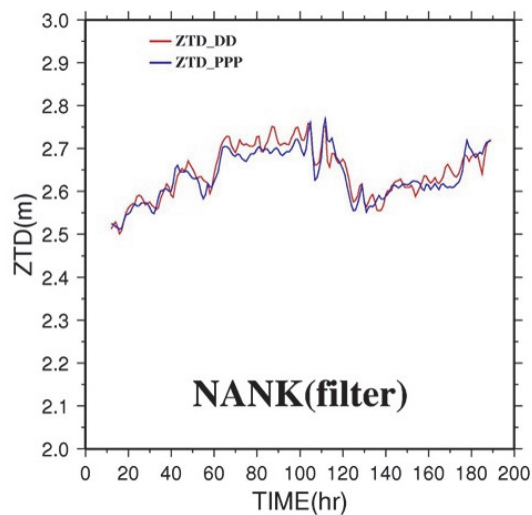
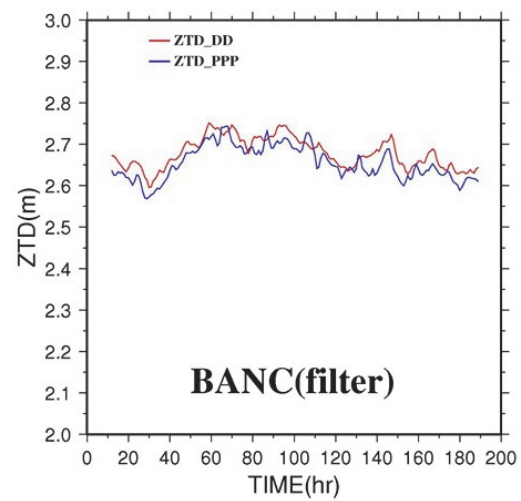
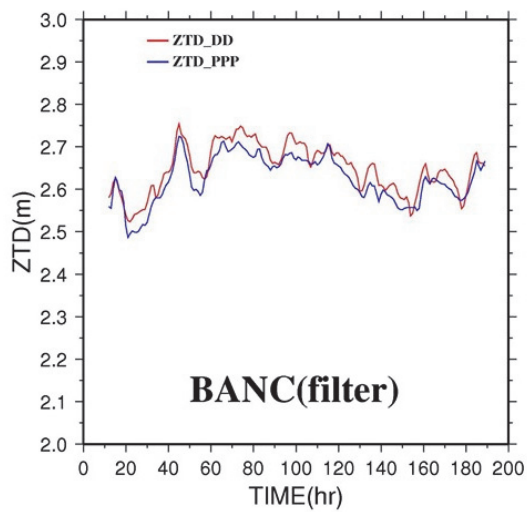
Table 3 The time difference and the maximum correlation coefficient of each GPS station (Typhoon Soudelor event)

編號	站名	出現相關係數最大值的時間差 (hr)	相關係數最大值
1	板橋BANC	5	0.385
2	玉山YUSN	-5	0.486
3	佳陽JYAN	-18	0.463
4	福隆FLON	-3	0.52
5	新竹HSIN	10	0.376
6	花蓮HUAL	-5	0.427
7	關西KSHI	4	0.475
8	林口LNKO	0	0.407
9	鹿野LONT	-13	0.536
10	坪林PLIN	-15	0.473
11	三地門SAND	0	0.536
12	通霄TSIO	-3	0.359
13	新社NSHE	-10	0.496
14	霧峰WFEN	0	0.535
15	南科NANK	0	0.462
16	小港SGAN	0	0.65
17	神岡SGUN	-5	0.521

表 4 各測站之時間差與相關係數最大值 (杜鵑颱風事件)。

Table 4 The time difference and the maximum correlation coefficient of each GPS station (Typhoon Dujuan event)

編號	站名	出現相關係數最大值的時間差 (hr)	相關係數最大值
1	板橋BANC	0	0.52
2	玉山YUSN	0	0.619
3	佳陽JYAN	-5	0.682
4	福隆FLON	0	0.569
5	新竹HSIN	-15	0.507
6	花蓮HUAL	-5	0.52
7	關西KSHI	-13	0.481
8	林口LNKO	-3	0.618
9	鹿野LONT	-13	0.436
10	坪林PLIN	5	0.633
11	三地門SAND	0	0.542
12	通霄TSIO	-8	0.605
13	新社NSHE	0	0.652
14	霧峰WFEN	0	0.619
15	南科NANK	0	0.431
16	小港SGAN	0	0.4
17	神岡SGUN	0	0.605



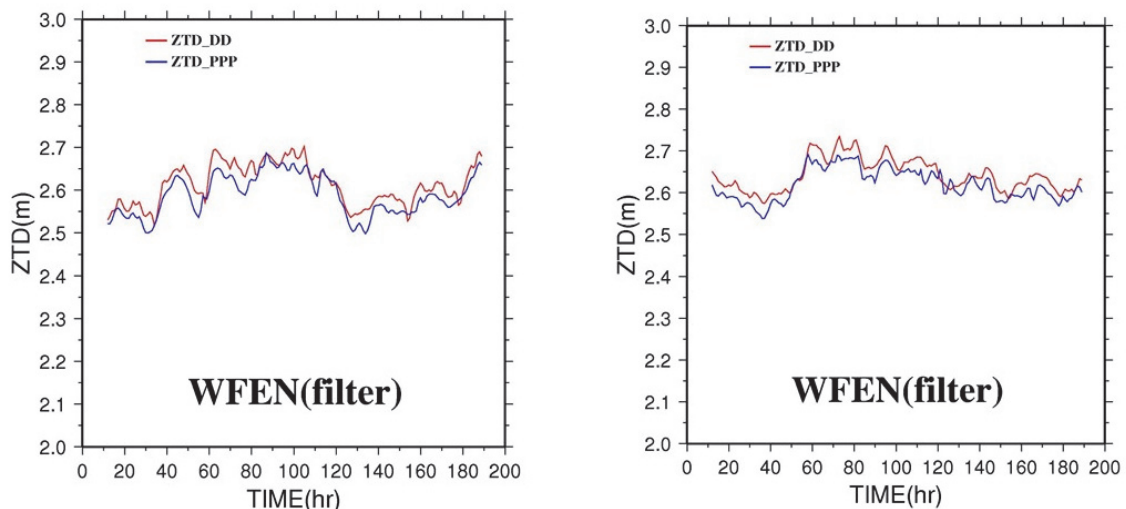


圖 5 板橋、南科及霧峰站 ZTD 結果圖 (左：蘇迪勒颱風；右：杜鵑颱風)

Fig.5 The ZTD results of the BANC,NANK and WFEN stations(left: Typhoon Soudelor ; right:Typhoon Dujuan)

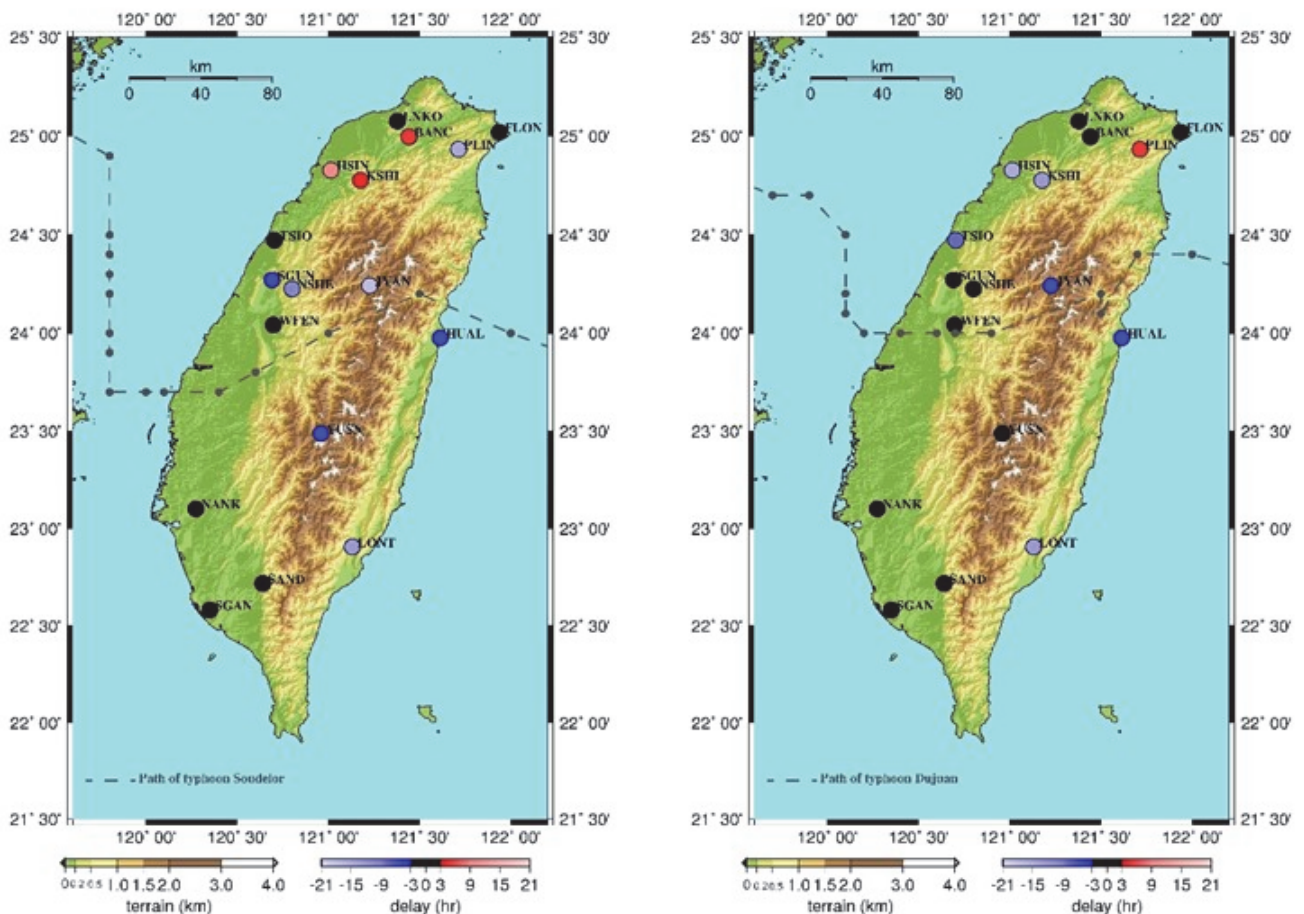


圖 6 互相關法中，各 GPS 測站最高相關係數結果示意圖 (左：蘇迪勒颱風；右：杜鵑颱風)

Fig.6 The highest correlation coefficient results at each GPS station by cross-correlation method, (left: Typhoon Soudelor ; right:Typhoon Dujuan)

整體而言，採用互相關法進行 ZTD 與降雨之相關性分析，可發現大多數測站 ZTD 值與大雨之時間差較小，即表示 ZTD 與降雨有正相關，大氣中水氣增加達到足以降雨之程度，同時 ZTD 亦增加。但就大豪雨預報角度而言，此研究中僅少部分

測站可以達到此目的 (即表 5 中時間差>3 小時之觀測站)，故整體而言，本研究認為若採用互相關法分析，則由 ZTD 值無法進行大雨預報之工作。

表 5 各 GPS 測站時間延遲統計表。

Table 5 The statistics of the time delays for all GPS stations

	蘇迪勒颱風 (測站個數)	杜鵑颱風 (測站個數)
時間差 < -3小時	7	6
-3小時 ≤ 時間差 ≤ 3小時	7	10
時間差 > 3小時	3	1

3. ZTD 斜率法之結論

在 ZTD 斜率法之分析結果中，整體而言，蘇迪勒颱風案例之成果明顯優於杜鵑颱風，故下面各成果圖均以顯示蘇迪勒颱風事件為主。由於中央氣象局對大雨定義為 24 小時累積雨量達 80 毫米以上，或時雨量達 40 毫米以上之降雨現象，故本研究將該測站是否達到大雨標準作為區分兩種情況：

情況一：有達到大雨標準，其結果如圖 7 所示。圖 7 顯示蘇迪勒颱風事件中，板橋、南港、福隆、關西、花蓮與玉山等站之成果，圖中 ZTD 斜率以紅線表示，ZTD 值以藍線，而時雨量則以綠線表示。由圖 7 可發現降雨時，ZTD 斜率會接近 0，呈現較為水平狀態，也代表 ZTD 值有數小時維持在一定的峰值，而在降雨發生前，ZTD 斜率皆有巨大的起伏，代表 ZTD 開始有升高的趨勢出現，也因為降雨前大氣中之水氣增加，使 ZTD 值提高。雖然圖 7 僅呈現板橋、南港、福隆、關西、花蓮與玉山等 6 站之成果，但其餘 11 個 GPS 站大致也呈現與此 6 站相同之結果，故整體而言，本研究認為在情況一的條件之下（達大雨標準），藉由 ZTD 斜率變化而預測豪大雨發生的時間，應為可行。另外，本研究也嘗試以不同 ZTD 斜率門檻值進行分析，最後發現在蘇迪勒颱風事件中，以 ZTD 斜率 0.009m/hr 為最佳，以關西站為例（如圖 8 與表 6 所示），當斜率值大於 0.009m/hr 時有機會發生大雨之情況。然而若以坪林站為例（如圖 9 與表 7 所示），圖中斜率超過門檻值者，並非全在大雨發生前，因此本研究認為大雨後之斜率高峰之原因，可在未來多加探討與研究。另一方面，在杜鵑颱風事件方面

，本研究所計算的 ZTD 斜率曲線結果並不如蘇迪勒颱風事件中有明顯大雨前震盪，降雨時趨於平緩之現象，吾人認為原因為杜鵑颱風所帶來之降雨量較少，風力作用更勝於降雨帶來之影響，故此 ZTD 趨勢較不明顯，但整體而言，本研究仍認為 ZTD 斜率法在豪大雨預報上仍深具潛力，值得進一步研究與發展。

情況二：無達到大雨標準，其結果如圖 10 所示。圖 10 顯示蘇迪勒颱風事件中，新社、小港、鹿野、通霄等站之成果。由圖 10 可發現在降雨期間 ZTD 斜率線並非如情況一呈現水平，而是有較多起伏，對於本研究在判斷預測時，有較大的不確定性。雖然圖 10 僅呈現新社、小港、鹿野、通霄等站之成果，但其餘 13 個 GPS 站大致也呈現與此 4 站相同之結果，故整體而言，本研究認為在情況二的條件之下（無達大雨標準），藉由 ZTD 斜率變化而預測豪大雨發生的時間，應不可行。這也可再次說明為何本研究 ZTD 斜率法相關成果中，杜鵑颱風之結果明顯差於蘇迪勒颱風，因杜鵑颱風所帶來的降雨量明顯較蘇迪勒颱風更少。

表 6 關西 KSHI 測站 ZTD 斜率與雨量間隔時間

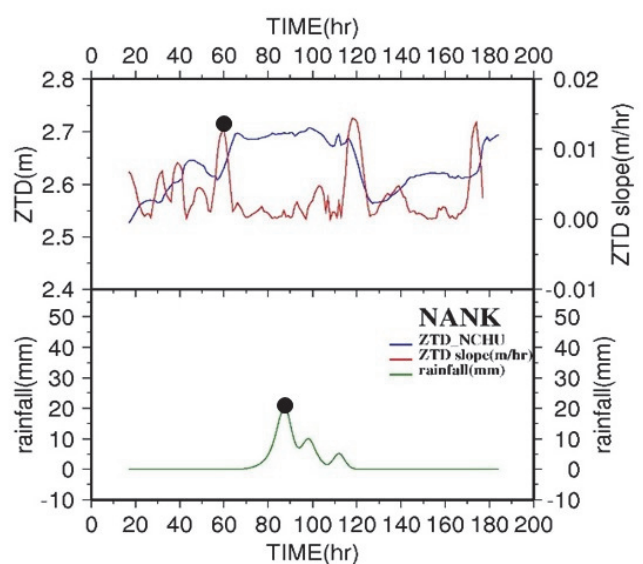
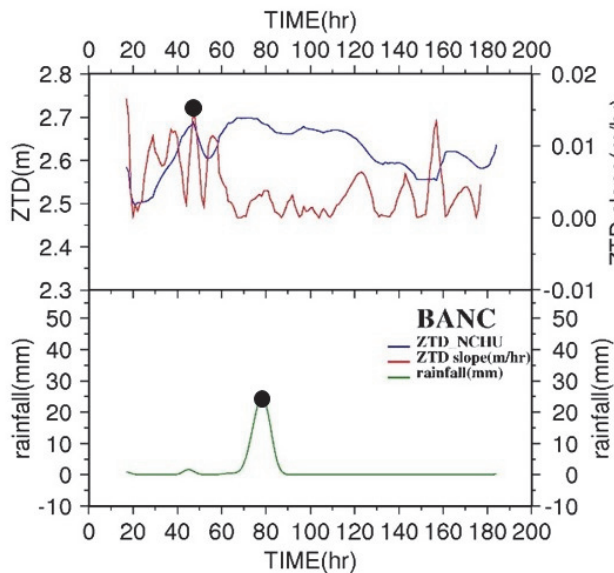
Table 6 The ZTD-derived slopes and rainfall intervals in KSHI station.

	蘇迪勒颱風	杜鵑颱風
雨量最大值發生時間	第72小時	第67小時
所對應ZTD斜率時間	第56小時	第64小時
(雨量最大值時間)-(所對應ZTD斜率時間)	16小時	3小時

表 7 坪林 PLIN 測站 ZTD 斜率與雨量間隔時間

Table 7 The ZTD-derived slopes and rainfall intervals in PLIN station.

	蘇迪勒颱風	杜鵑颱風
雨量最大值發生時間	第80小時	第67小時
所對應ZTD斜率時間	第55小時	第51小時
(雨量最大值時間)-(所對應ZTD斜率時間)	25小時	16小時



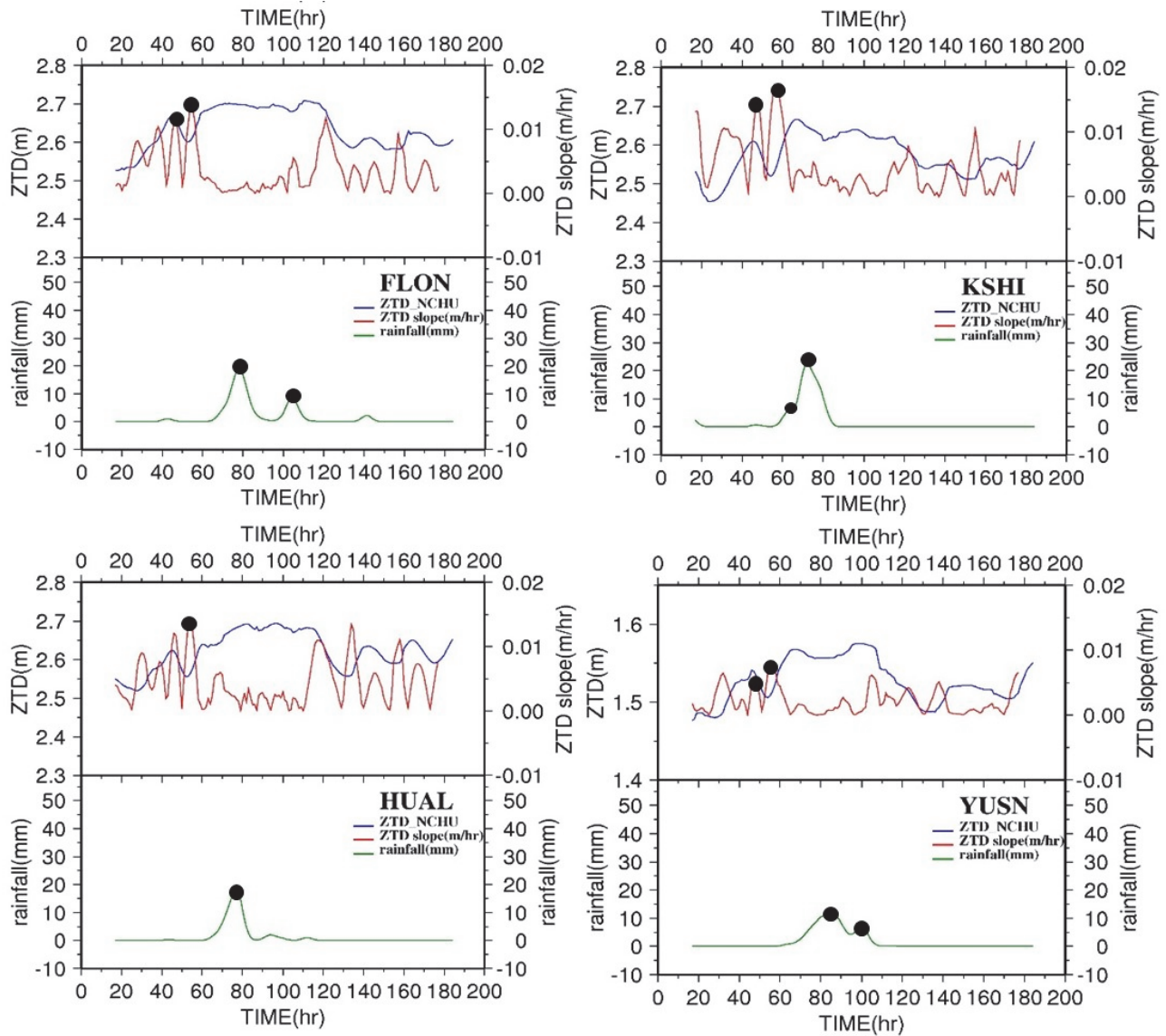


圖 7 蘇迪勒颱風事件 ZTD 斜率法結果圖 (達大雨標準)

Fig.7 The results using ZTD slope method in Typhoon Soudelor event (reaching the standard of heavy rain)

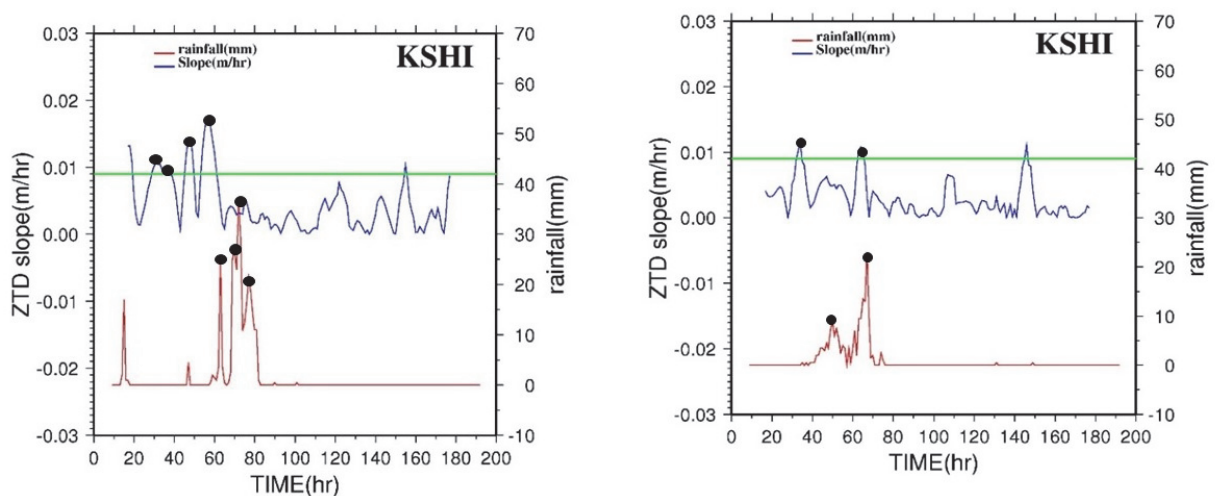


圖 8 關西 KSHI 測站 ZTD 斜率與雨量圖 (左：蘇迪勒颱風；右：杜鵑颱風)

Fig.8 The ZTD-derived slopes and rainfalls at KSHI station (top: Typhoon Soudelor ; bottom:Typhoon Dujuan)

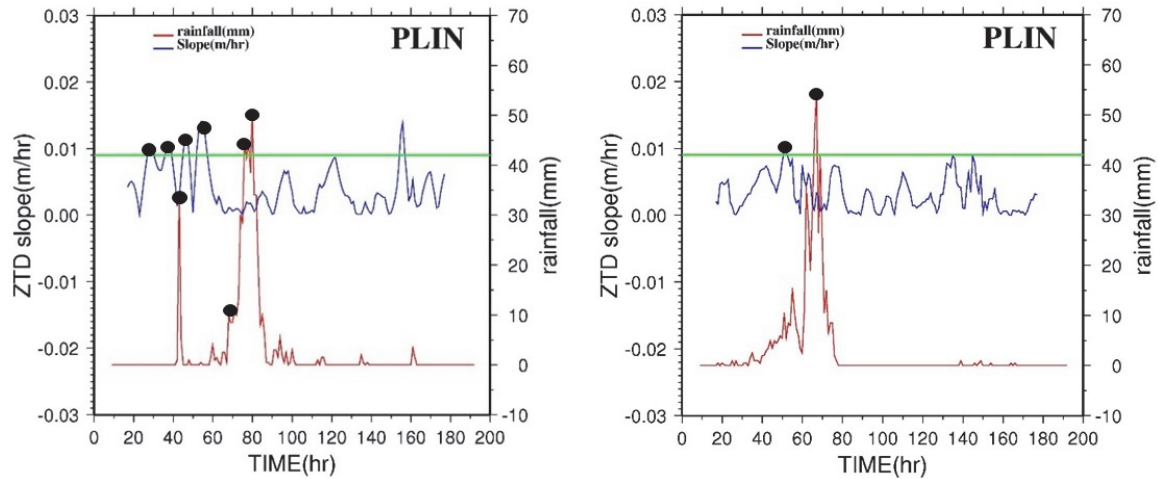


圖 9 坪林 PLIN 測站 ZTD 斜率與雨量圖 (左：蘇迪勒颱風；右：杜鵑颱風)

Fig.9 The ZTD-derived slopes and rainfalls at PLIN station (top: Typhoon Soudelor ; bottom: Typhoon Dujuan)

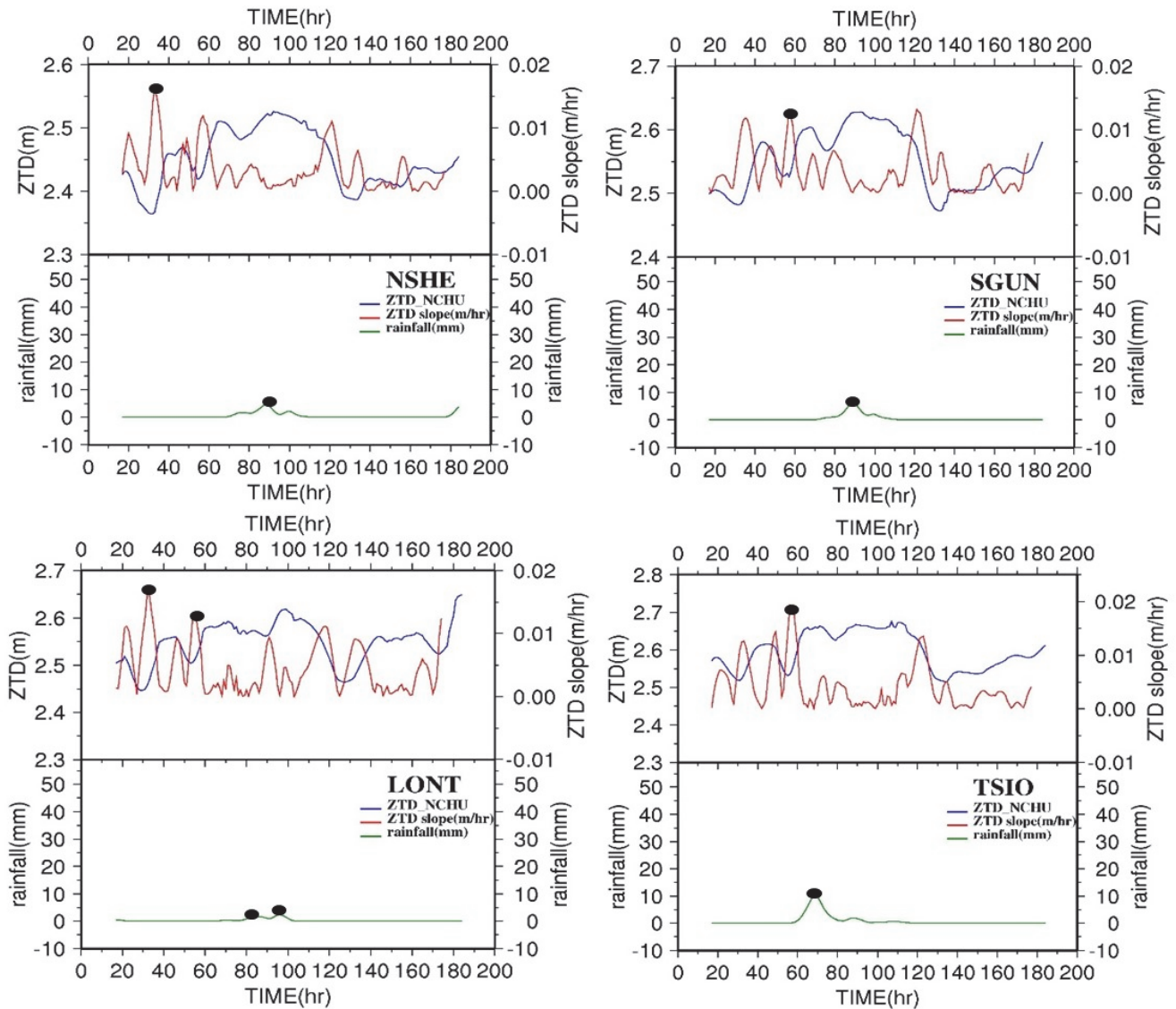


圖 10 ZTD 斜率法結果圖 (未達大雨標準)

Fig.10 The results using ZTD slope method (not reaching the standard of heavy rain)

四、結論與建議

本研究分析 GPS 資料所計算之 ZTD 與降雨之相關性，並評估此方法應用於預報大豪雨之可行性。研究中使用 PPP 法來計算 17 個 GPS 觀測站之 ZTD 值，並與傳統採用 DD 法所計算之 ZTD 值比較。在 ZTD 與降雨之相關性分析中，分別採用互相關法與 ZTD 斜率法來分析。在研究資料方面，選擇兩個路徑相近之颱風事件（蘇迪勒颱風、杜鵑颱風）進行討論，結果如下：

1. 研究顯示，PPP 法與 DD 法解算之 ZTD 值具有高度相關性，在 17 個測站中採用兩種方法解算得到之相關係數值達 0.9367，故可證明 PPP 法所計算之 ZTD 有可信度。
2. 透過互相關法將固定 ZTD 值之時間區間，與往前數小時或往後數小時之降雨資料進行相關係數比較，找尋其中相關係數最大值。由於影響 ZTD 之因素多，並且颱風能使短時間內大氣環境巨大變化，使得 ZTD 與實際降雨不同步或者該項分析方法難完全表現出其相關性，故此方法進行預估大雨發生時間之可行性偏低，故未來若要以 ZTD 預測大雨，以 ZTD 斜率法來計算 ZTD 變化率較有可能。
3. 本研究可以發現於降雨來臨前斜率皆有較大之起伏，本研究認為可將以此現象推算出數小時後大雨來臨。目前研究顯示當天氣狀況達大雨標準時，ZTD 斜率法有機會且有潛力預測降雨發生時間，然而不同颱風事件相同測站而言，預測時間也大相逕庭，也許本研究除了颱風路徑方面的考量，更應該加入颱風強度、季節（夏、秋）、結構狀態等影響條件，使得本研究之預測時間更加精準。

誌 謝

本文為科技部補助之研究計畫成果，相關計畫編號包括：102-2116-M-008-001，104-2625-M-008-004，105-2625-M-008-011 和 105-2221-E-005-014 等，謹此致謝。

參考文獻

- [1] 陳彥秋、陳國華、楊名 (2008)，「應用水氣輻射天頂延遲觀測量於 GPS 相對定位之研究」，地籍測量，27(3)，23-45。(Chen, Y.D., Chen, K.H., and Yang, M. (2008). "Application of Water Vapor Radiometer Zenith Delay Measurements." *Journal of Cadastral Survey*, 27(3), 23-45.(in Chinese))
- [2] 林老生 (2009)，「GPS 精密單點定位在地籍測量之應用」，台灣土地研究，12(2)，1-25。(Lin, L.S. (2009). "Application of GPS Precise Point Positioning to Cadastral Surveying." *Journal of Taiwan Land Research*, 12(2), 1-25. (in Chinese))
- [3] 楊名 (2010)，發展臺灣區域性對流層延遲估算模式先期研究作業，內政部國土測繪中心期末報告。(Yang, M. (2010). "Development of A Preliminary Study on the regional tropospheric delay estimation model in Taiwan", Final Report, National Land Surveying and Mapping Center, MOI. (in Chinese))
- [4] 彭微之 (2010)，「基於 GPS 網格 PPP 技術對流層延遲量於強降雨期間的時頻分析」，國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文。(Peng, W.C. (2010). *Time Frequency*

Analysis of Tropospheric Wet Delay Series Monitored by GPS-PPP during Extreme Rainfall, Master Thesis, National Cheng Kung University. (in Chinese))

- [5] 蔡雅婷、洪景山 (2012)，「同化地基 GPS ZTD 資料在午後對流個案之定量降雨預報」，大氣科學，40(1)，29-48。(Tsai, Y.T., and Hong, J.S. (2012). "Assimilation of Zenith Total Delay on Improving the Model Quantitative Precipitation Forecast for Afternoon Thunderstorms." *Atmospheric Science*, 40(1), 29-48. (in Chinese))
- [6] 葉大綱、龐士鈞、蕭棟元、洪景山 (2017)，「驗證 GPS 衛星訊號反演之大氣可降水量」，國土測繪與空間資訊，5(1)，68-81。(Yeh, T.K., Pang, S.C., Hsiao, T.Y., and Hong, J.S. (2017). "Verification on the precipitable water vapor of GPS satellite signals." *Taiwan Journal of Geoinformatics*, 5(1), 68-81. (in Chinese))
- [7] GPS 精密求定大氣可降水及服務網(<http://120.126.139.90:8080>) (GPS precision determination of atmospheric precipitation and service network.(in Chinese))
- [8] 陳國華、劉新達、黃金土 (2009)，「無差分 GPS 精密單點定位技術 (PPP) 之動態定位精度：以輔助航空攝影測量空中三角測量為例」，航測及遙測學刊，14(1)，65-81。(Chen, K.H., Liu, H.T., and Huang, J.H. (2009). "The Kinematic Positioning Accuracy of Using GPS Precise Point Positioning (PPP) Technique: a case study in supported Aerial Triangulation." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 14(1), 65-81. (in Chinese))
- [9] 觀測資料查詢系統 CODiS (2017). <http://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp> (CWB Observation Data Inquire System (inChinese))
- [10] Dach, R., Lutz, S., Walser, P., and Fridez, P. (2015), Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. doi: 10.7892/boris.72297.
- [11] Hordyniec, P. (2014). "Modelling of Zenith Tropospheric Delays and Integrated Water Vapor Values." *Geodetický a kartografický obzor*, 60(12), 309-317.
- [12] Yeh, T.K., Hong, J.S., Wang, C.S., Hsiao, T.Y., and Fong C.T. (2014). "Applying the water vapor radiometer to verify the precipitable water vapor measured by GPS." *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 25(2), 189-201.
- [13] Yeh, T.K., Wang, C.S., Hong, J.S., and Hsiao, T.Y. (2015). "Analyzing the Variation of Precipitable Water Vapor with Ground-Based GPS Over Taiwan." *International Association of Geodesy Symposia*, doi: 10.1007/1345_2015_37 Springer International Publishing Switzerland 2015.
- [14] Yeh, T.K., Hong, J.S., Wang, C.S., Chen, C.H., Chen, K.H., and Fong, C.T. (2016). "Determining the precipitable water vapor with ground-based GPS and comparing its yearly variation to rainfall over Taiwan." *Advances in Space Research*, 57(12), 2496-2507.

2018 年 02 月 25 日 收稿

2018 年 07 月 31 日 修正

2018 年 08 月 06 日 接受

(本文開放討論至 2019 年 03 月 31 日)