

計畫編號：111 保發-8.1-保-01-06-20211115114543

梅雨鋒面肇致坡地災害之個案研究
A Case Study of Sloping Land Disasters
Caused by Mei-Yu Front
期末報告書

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：林得恩 助理研究員

協同主持人：陳明仁 博士

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

梅雨鋒面肇致坡地災害之個案研究

摘要

從過往土砂災害事件統計發現，事件一旦肇生，其所造成的損失與災害均相當嚴重。

本研究計畫的執行，主要目的為透過科學量化的研判步驟，對歷史土砂災害事件進行診斷分析，瞭解梅雨鋒面產生劇烈降雨事件的氣候特徵與環境條件，釐清當時環境的關鍵氣象參數表現，進而延長土砂災害可能肇生的事先預警整備時間，有效支援強化防災應變指揮官進行災害警戒調度的決心下達。

最後，利用高解析度氣象數值模式進行模式模擬與校驗，研析劇烈降雨的可能物理過程，並有效回饋至防災預警的實際整備作業上。

關鍵詞：梅雨鋒面、土砂災害、氣象參數特徵、數值模式模擬

A Case Study of Sloping Land Disasters Caused by Mei-Yu Front

Abstract

From the statistics of past soil and sand disaster events, it is found that once the event occurs, the losses and disasters caused are quite serious.

The main purpose of the implementation of this research project is to diagnose and analyze historical soil and sand disaster events through scientific and quantitative research and judgment steps, understand the climatic characteristics and environmental conditions of the severe rainfall events generated by the Mei-Yu front, and clarify the performance of key meteorological parameters in the environment at that time, and then extend the pre-warning and preparation time for possible occurrence of soil and sand disasters, and effectively support and strengthen the determination of disaster prevention and response commanders to dispatch disaster alerts.

Finally, the high-resolution meteorological numerical model is used to carry out model simulation and sensitivity testing, to analyze the possible physical process of severe rainfall, and to effectively feed back to the actual preparation of disaster prevention and early warning.

**Keywords: Mei-Yu Front , soil and sand disaster, meteorology
characteristics, numerical model simulation**

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	VIII
第一章 緒論.....	1-1
第二章 工作執行方法與步驟.....	2-1
第一節 工作執行方法.....	2-1
第二節 工作執行步驟.....	2-45
第三章 工作執行進度與階段性成果.....	3-1
第一節 工作執行進度.....	3-1
第二節 階段性成果.....	3-6
第四章 結論與建議.....	4-1
參考文獻.....	附錄-1
期初報告委員提問意見及答覆.....	附錄-5
期中報告委員提問意見及答覆.....	附錄-10
期末報告委員提問意見及答覆.....	附錄-14

表次

表 2-1 2006 年 6 月 8 日 1200UTC 至 11 日 1200UTC 期間 NCEP 分析場、模式控制實驗(CNTL)及無潛熱釋放實驗(FDR)之海平面氣壓(hPa)、850 hPa 高度場(gpm)及 850 hPa 風速(m/s)差異比較(比較區域取東經 114-120 度；北緯 19-25 度平均結果)	2-44
表 3-1 計畫重要工作項目與預期進度管制表.....	3-3
表 3-2 計畫交付項目管制表.....	3-5

圖次

圖 2-1	2006-2021 年期間, 逐年土砂災害事件肇生次數統計.....	2-3
圖 2-2	2006-2021 年期間, 土砂災害事件肇生的時空分布統計.....	2-3
圖 2-3	2006-2021 年期間, 土砂災害事件肇因的統計分析.....	2-4
圖 2-4	研究流程規劃.....	2-5
圖 2-5	透過衛星雲圖中雲頂溫度及其所涵蓋的雲系面積, 進一步來 分析劇烈降雨天氣系統的時空分佈及發展演變過程.....	2-15
圖 2-6	NCEP/DOE Reanalysis-I 經緯度網格分析場資料.....	2-16
圖 2-7	中央氣象局劇烈天氣監測系統(QPESUMS)資料.....	2-16
圖 2-8	2006 年 6 月 9 日及 10 日 0800 LST 海平面氣壓及風場..	2-17
圖 2-9	同圖 2-8, 但為海平面氣壓及 1000 hPa 的風場及比溼分佈..	2-17
圖 2-10	同圖 2-8, 但為 850 hPa 的風場、高度場及相當位溫分佈..	2-17
圖 2-11	同圖 2-8, 但為 700 hPa 風場、高度場及垂直速度分佈....	2-18
圖 2-12	同圖 2-8, 但為 500 hPa 風場、高度場及渦度場分佈.....	2-18
圖 2-13	同圖 2-8, 但為 300 hPa 風場及高度場分佈.....	2-19
圖 2-14	同圖 2-8, 但為 850 hPa 風速大於 20 kt 區域分佈.....	2-19
圖 2-15	2006 年 6 月 8 日 2000 LST 之位溫 (θ) 與相當位溫 (θ_e) 分佈.....	2-20
圖 2-16	2006 年 6 月 8 日 2000 LST 之馬公探空測站斜溫圖.....	2-20
圖 2-17	2006 年 6 月 8 日 0000 UTC 至 11 日 1800 UTC 北緯 23 度之 925hPa 水氣輻散通量序列圖.....	2-21

圖 2-18	2006 年 6 月 8 日至 11 日 0000 UTC 鋒面位置分佈.....	2-21
圖 2-19	研究個案之垂直大氣環境的時間序列分佈，紅虛線為相當位溫，實藍線為水氣，色階區為相當位溫大於 340K 區域；其中，46734 為個案馬公站，46750 為個案屏東站資料....	2-22
圖 2-20	2006 年 6 月 9 日及 10 日 0000 UTC 低層 700 hPa(紅色虛線為槽線)及高層 300 hPa(黑色實線為槽線)之高度場分佈.....	2-23
圖 2-21	2006 年 6 月 9 日及 10 日 0000 UTC 500 hPa 高度場(黑色實線為槽線)及溫度槽(紅色虛線為槽線)分佈.....	2-23
圖 2-22	個案所造成豪大雨事件之綜觀環境示意圖.....	2-24
圖 2-23	上列 2 圖為 2006 年 6 月 9 日至 10 日，緯度—時間落雷頻率分佈圖，下列 2 圖為經度—時間落雷頻率分佈圖.....	2-24
圖 2-24	中央氣象局劇烈天氣監測系統雷達產品顯示研究個案之降水型態的差異.....	2-25
圖 2-25	個案研究彙整所得梅雨鋒面劇烈降雨之環境量場檢查表.....	2-26
圖 2-26	整體技術得分計算結果（分別就土砂災害事件發生前 6 小時、前 12 小時及前 24 小時）.....	2-26
圖 2-27	模式設計三層巢狀網格，外層粗網格（D1）水平解析度為 27	

公里，中層網格 (D2) 水平解析度為 9 公里，以及內層細網	
格(D3)水平解析度為 3 公里.....	2-32
圖 2-28 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 海平面氣壓（實	
線，間距為 3hPa）及風場（全桿與半桿風標分別表示風速	
為 5 與 2.5m/s)	2-32
圖 2-29 2006 年 6 月 9 日 0000 UTC 至 10 日 1800 UTC 每時間間格	
六小時之亮度溫度(色階區，間距為 10K).....	2-33
圖 2-30 2006 年 6 月 9 日 0000 UTC 至 10 日 1800 UTC 每時間間格	
六小時 IR 雲圖.....	2-33
圖 2-31 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 850 hPa 的風	
場、高度場及相當位溫.....	2-34
圖 2-32 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 700 hPa 風場、	
高度場及垂直速度.....	2-34
圖 2-33 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 500 hPa 風場、	
高度場及渦度場分佈.....	2-35
圖 2-34 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 300 hPa 風場及	
高度場分佈.....	2-35
圖 2-35 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 850 hPa 風速大	
於 20 Kt 區域分佈.....	2-36

圖 2-36	WRF 模式(D3)模擬 2006 年 6 月 9 日及 10 日日累積雨量(雨量單位為毫米).....	2-36
圖 2-37	2006 年 6 月 9 日 0000 UTC 至 10 日 1800 UTC 每六小時之整合雷達回波圖.....	2-37
圖 2-38	WRF 模式(D3)模擬 2006 年 6 月 9 日 0300 UTC 至 10 日 2100 UTC 每三小時之累積雨量(雨量單位為毫米).....	2-37
圖 2-39	2006 年 6 月 8 日 1200 UTC 至 11 日 1200 UTC , 位於台灣上游區域平均(東經 114-120 度;北緯 19-25 度)之 850 hPa (a) 風速(單位為)及(b)相當位溫(單位 K)時間序列(黑色線為 NCEP 資料,紅色線為 WRF 模擬結果).....	2-38
圖 2-40	模式 FDR 實驗模擬 2006 年 6 月 (a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 850 hPa 的風場 (全桿與半桿風標分別表示風速為 5 與 2.5 m/s) 及高度場(實線,間距為 20 gpm)分佈.....	2-41
圖 2-41	模式 FDR 實驗模擬 2006 年 6 月 (a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 850 hPa 風速大於 20 kt 區域(色階區)分佈.....	2-41
圖 2-42	控制實驗(CNTL)與無潛熱釋放實驗(FDR)模擬 2006 年 6 月 8 日 1200 UTC 至 11 日 1200 UTC 逐時,位於台灣上游區域平均(東經 114-120 度;北緯 19-25 度)之 850 hPa 風速(m/s) 時間序列(黑色線為 CNTL、紅色線為 FDR 模擬結果)...	2-42

圖 2-43 控制實驗(CNTL)與無潛熱釋放實驗(FDR)模擬 2006 年 6 月 8 日 1200 UTC 至 11 日 1200 UTC 逐時，位於台灣上游區域平均(東經 114-120 度；北緯 19-25 度)(a)850 hPa 高度場(gpm)及(b)海平面氣壓場(hPa)之時間序列(黑色線為 CNTL、紅色線為 FDR 模擬結果).....2-43

第一章 緒論

肇致坡地災害的 3 個重要條件，分別為一定的地形坡度、坡度上要有足夠的堆積物，以及充沛的降雨量；尤其是降雨行為，更是整個事件肇生的驅動者。然而，降雨只是結果，環境條件以及氣象量場在整個發展過程的前兆時刻，行為特徵已起變化。

因此，執行本計畫，擬解決以下幾個問題：延長土砂災害可能肇生的事先預警整備時間、增進對土砂災害事件發生前兆之梅雨鋒面綜觀環境條件的認識與掌握，以及有效支援強化防災應變指揮官進行土砂災害警戒調度的決心下達。

計畫目標，有以下 4 項：

- (1) 統計診斷梅雨鋒面產生劇烈降雨事件的氣候特徵與環境條件。
- (2) 從土砂災害事件當中，診斷評估出事件發生前 6、12 及 24 小時之綜觀環境條件的特徵，以及梅雨季劇烈降雨氣象量場的特性，歸納釐清出異動變化的關鍵訊號。
- (3) 經由高解析度氣象數值模式 WRF(Weather Research and Forecasting Model)進行模式模擬，嘗試釐清梅雨鋒面前兆環境的關鍵變化，並有效回饋至防災預警的實際整備作業上。
- (4) 建置梅雨鋒面可能肇致土砂災害事件之環境前兆所對應的氣候概念模式，掌握氣象因子的變化趨勢與重要參數。

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

1. 實施方法：

彙整統計過去 16 年(2006-2021 年)臺灣土砂災害事件的時間、地點、肇因及災情等基礎背景資料，做為本研究的個案樣本（其中，土砂災害事件選取，以水保局官網公告標定之重大災害事件為準）。對應過去 16 年（2006-2021 年）梅雨季的大豪雨個案，進行劇烈天氣之前兆環境的比對診斷，嘗試釐清可能肇致強降雨之關鍵氣象參數的量化特徵與變化脈動。

選取土砂災害事件包含有土石流、崩塌、地滑、洪水、沖蝕。統計分析結果顯示，土砂災害肇生次數有減少趨勢，前 8 年的肇生事件數，佔總數的 73.4%；土砂災害事件肇生個數以 2009 年最多（共 127 件），2020 年最少（共 3 件），均與颱風肇因有關，年際分布並無規律變化的特徵（如圖 2-1）。最容易肇生的地區分別有新北市、宜蘭縣、南投縣、嘉義縣、高雄市及屏東縣；其中，高屏兩地合佔總數的 26.4%最多。另一方面，最常發生的時段落在 6-10 月，暖季合佔總數的 93.0%最多（圖 2-2），對應颱風與梅雨鋒面等天氣系統影響，與原先預期相當吻合。然而，我們更關心當有土砂災害事件發生之際，當時的天氣系統以及環境特徵。結果顯示，主要可分為 5 大類型（圖 2-3），分述如下：

1. 第 1 種類型：颱風、熱帶擾動或颱風過後所引進的西南氣流，共計 395 件，佔總數的 75.4%。

2. 第 2 種類型：梅雨鋒面，共計 85 件，佔總數的 16.1%。

3.第 3 種類型：非梅雨鋒面的鋒面，以及午後雷陣雨，共計 24 件。

4.第 4 種類型：東北季風，以及東北季風與南方低壓系統所結合的共伴環流，共計 14 件。

5.第 5 種類型：地震，共計 9 件。

其中，第 1 種類型加上第 2 種類型就佔總數的 91.1%，顯見颱風（以及熱帶擾動或颱風過後所引進的西南氣流）及梅雨鋒面對我土砂災害事件的肇生，扮演非常關鍵的角色。然而，就天氣系統的綜觀環境條件來看，無論是在空間尺度或是時間尺度上，颱風的可預報度顯然高於梅雨鋒面（颱風的空間尺度在數百至千公里，時間尺度在數天），且根據過去研究顯示，梅雨鋒面常伴隨有組織性的中小尺度對流天氣系統，常易肇致短延時強降雨的實際案例。爰此，本年度將先針對梅雨鋒面肇致坡地災害事件進行個案研究，主要運用氣候統計、診斷分析，以及數值模擬等研究方法；後續再視研究需求，將颱風或其它肇因個案納入。

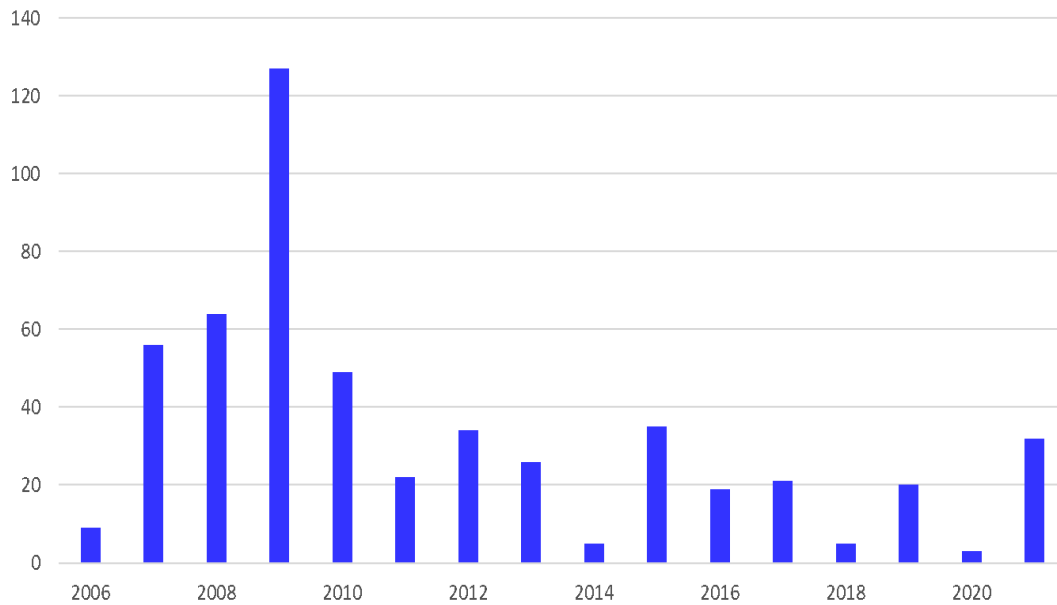


圖 2-1 2006-2021 年期間，逐年土砂災害事件肇生次數統計

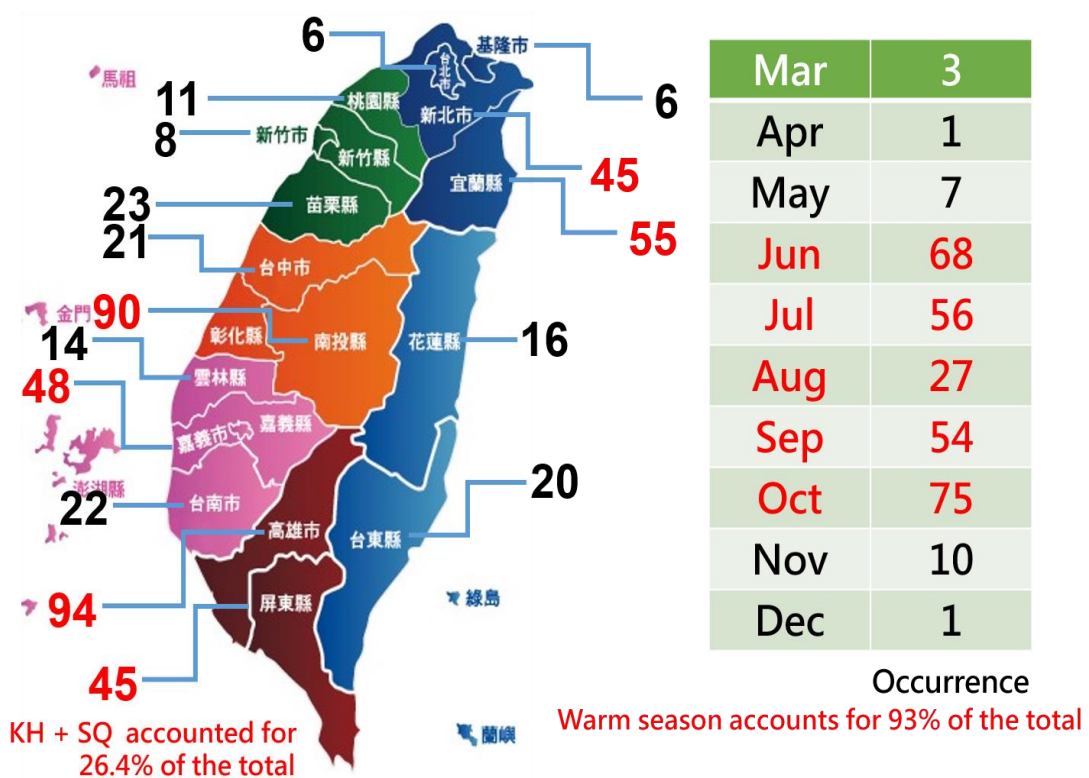
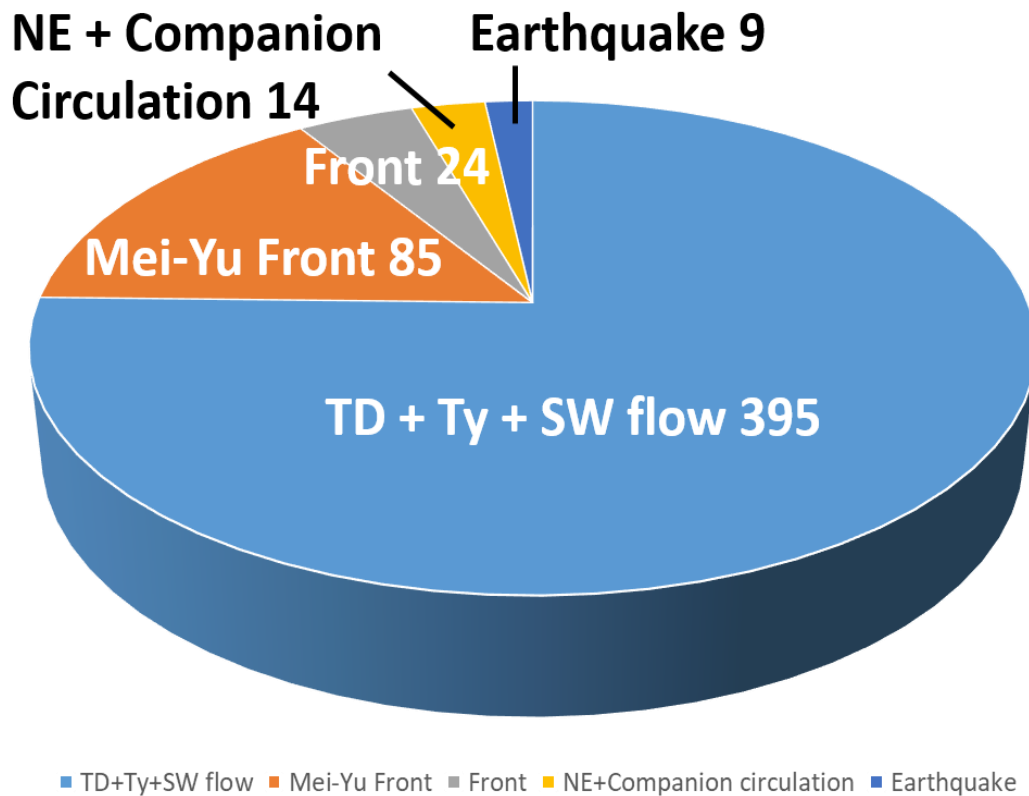


圖 2-2 2006-2021 年期間，土砂災害事件肇生的時空分布統計



TD + Ty + SW flow for 75.0% of the total
Mei-Yu Front for 16.1% of the total

圖 2-3 2006-2021 年期間，土砂災害事件肇因的統計分析

主要研究流程規劃如圖 2-4，囊括有氣候統計、診斷分析，以及數值模擬等不同研究方法，進行整體性的評估與分析探討。研究完成重要工作項目，計有建置梅雨鋒面事件可能發生前兆環境的概念模式，以及運用高解析度模式進行模擬校驗，建置穩定可靠的梅雨鋒面強降雨綜觀環境診斷指標等 2 大點。分述如下：

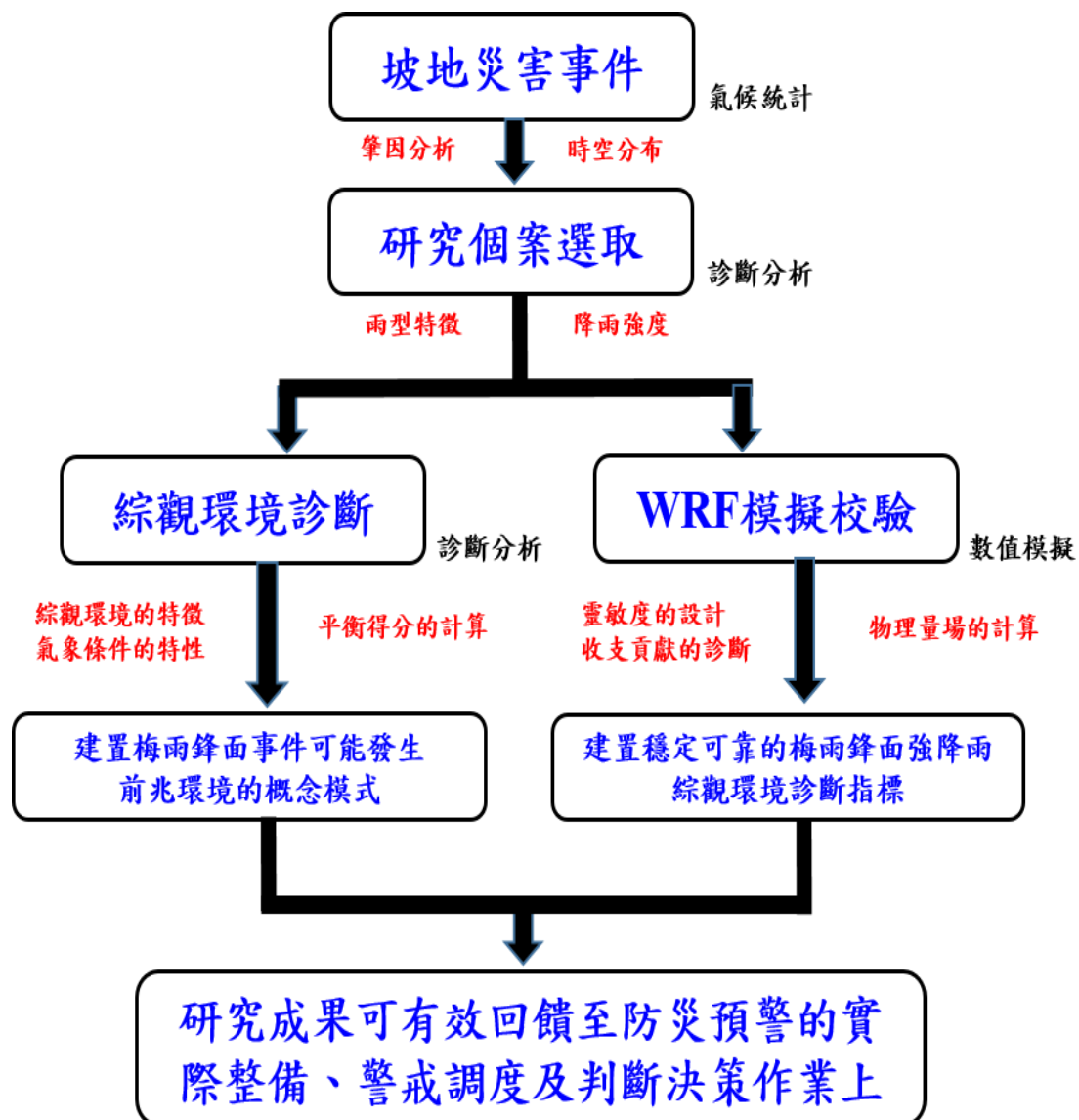


圖 2-4 研究流程規劃

(1)建置梅雨鋒面事件可能發生前兆環境的概念模式：

使用有經過 MB 色調強化及校正的紅外線衛星雲圖(因資料來源限制，2003 年 5 月 22 日以前用 GMS-5 地球同步衛星資料，5 月 22 日以後，則選用 GOES-9 紅外線衛星雲圖取代，2006 年後則使用 MTSAT 衛星資料，2015 年後改用向日葵氣象衛星資料)，每張雲圖時間間隔為一小時，選取範圍涵蓋大陸華南地區、海南島、南海、台灣海峽及本省地區(即 $18-30^{\circ}\text{N}$ ， $108-122^{\circ}\text{E}$)，透過雲圖中雲頂溫度及其所涵蓋的雲系面積來分析梅雨鋒面的時空分佈及發展演變過程(圖 2-5)。

NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction / Department of Energy) Reanalysis-I 經緯度網格分析場資料，水平經緯度網格解析度為 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ ，每日計有四次(分別為 0000、0600、1200 及 1800 UTC)之 1000 hPa、975 hPa、950 hPa、925 hPa、900 hPa、850 hPa、800 hPa、750 hPa、700 hPa、650 hPa、600 hPa、550 hPa、500 hPa、450 hPa、400 hPa、350 hPa、300 hPa、250 hPa、200 hPa、150 hPa、100 hPa、70 hPa、50 hPa、30 hPa、20 hPa、10 hPa 等 26 層網格資料，針對選取個案，進行前 6、12 及 24 小時的不同氣象量場診斷；其中包含重力位高度、渦度、風向、風速、溫度、氣壓、降水、平均氣流、水氣通量、輻合、輻散以及相對位溫等氣象參數(圖 2-6)。

也利用中央氣象局官方網頁、國家災害防救科技中心的 WATCH 網頁、中央氣象局劇烈天氣監測系統(QPESUMS)資料(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor，圖 2-7)等，進行氣象量場診斷分析以及各崩塌個案降雨雨型、特徵以及強度的評估參考資料；統計彙整在土砂災害事件肇生前，梅雨鋒面之綜觀

環境條件的特徵以及氣象量場分布的特性，再透過現地探勘校驗作業，與實際雨量站的觀測數值進行分析比對，俾利完成預報檢查表項目的挑選釐定。

為評估綜觀環境條件各檢查滿足項目對於預報災區強降雨的預兆得分(Threat Score, TS)，設定觀測雨量門檻值，且設定目標災區中有任一測站達強降雨標準，即視為滿足強降雨發生。將各項目檢查預報結果與實際觀測資料分別進行比對，利用誤差矩陣判斷各次評估之準確率，誤差矩陣可分為 4 種情境，分別為滿足，有預測/有發生(hits)、滿足，有預測/無發生(misses)，無滿足，無預測/有發生(false alarms)，無滿足，無預測/無發生(no events)。故可利用其分類結果，進一步計算可偵測率(Probability of Detection, POD)、誤報率(False Alarm Ratio, FAR)以及預兆得分(Threat Score, TS)等三種評估指標，藉以掌握可靠性較高且滿足土砂災害事件肇生的梅雨鋒面綜觀環境條件關鍵因子，可有效回饋於災區強降雨發生與否的預報參考指標。

根據氣候統計資料來看，梅雨季台灣地區所肇生的大豪雨事件中，平均梅雨季一年會有 1.09 次超大豪雨事件發生，而每次的大豪雨事件平均可維持在 1.58 天或以上。研究針對過去 16 年梅雨季，導致台灣局部地區降雨分佈範圍最廣、降雨量最豐，且降雨延時最久的超大豪雨個案中，選取 2006 年 6 月 8 至 11 日間伴隨梅雨鋒面的組織性中尺度對流系統(Mesoscale convective system, MCS)個案進行診斷分析與數值模擬，該個案單 6 月 9 日的累積降雨量就高達 718 mm，期間共有 89 個站達到超大豪雨標準，也使得劇烈豪大雨事件為台灣中南部地區帶來嚴重的災情，最後衍生南投及高雄等處的坡地災害。

2006 年 6 月 9 日至 10 日海平面氣壓圖顯示(圖 2-8)，低壓中

心位於日本九州附近，向東北東方向移動，鋒面由此低壓中心向西南延伸至台灣地區至東京灣一帶。原位於華南沿海之移動性高壓環流與西南季風在台灣至南海地區形成一匯流輻合區。由於6月9日0800 LST至6月10日0800 LST期間太平洋高壓勢力並未有減弱趨勢，因此滯留鋒面於6月10日0800 LST仍停滯於台灣地區。直至6月10日2000 LST後，太平洋高壓勢力略為東退減弱，鋒面始逐漸南移至台灣東部外海一帶。

從紅外線衛星雲圖來看，於6月9日0000 LST位於台灣海峽及華南沿海地區已有範圍較小之對於雲系發展，此時對流雲系為一初期生成階段，隨後0600 LST至1200 LST雲圖顯示（圖2-5），位於南海地區MCS持續發展，並不斷朝台灣地區移入，至1800 LST位於南海地區之MCS已有明顯減弱之現象。但在6月10日0000 LST，南海地區MCS再度被激發，且仍持續朝台灣地區移入，由6月10日0600 LST雲圖顯示，台灣地區有一較強之MCS移入，並於6月10日1200 LST後逐漸減弱並向東南移出。經由IR雲圖我們可以發現，位於台灣海峽至南海地區之中尺度對流雲系形成後，持續增強發展，並朝台灣地區移入。在此期間，共計有兩次較強的MCS由南海地區生成及移入台灣地區，並導致台灣西部地區降下持續性豪大雨天氣。

由1000 hPa風場及溼度場分佈顯示（圖2-9），6月9日及10日0800 LST均有一低層風切橫跨台灣至南海地區，風切線前緣有一顯著的西南氣流，且伴隨較高的水氣量分佈於南海至台灣中南部地區。6月9日至10日位於850 hPa風切線（圖2-10）位置略較1000 hPa偏高，風切線主要分佈於台灣北部至大陸沿海一帶，但在風切線前緣仍為一強勁的西南氣流，尤其是南海至台灣中南部地區，不但有較強

的西南氣流，同時亦存在一較高相當位溫分佈，由南海經台灣中南部至台灣東部外海，此一現象顯示，低層西南氣流將低緯地區較高的相當位溫帶往南海及台灣地區，使得此區域大氣轉變為較暖溼的秉性。但從 1000 hPa 水氣及 850 hPa 相當位溫分佈可以發現，6 月 10 日 0800 LST 南海至台灣地區的水氣及相當位溫均較 6 月 9 日 0800 LST 小，顯示由低層由較低緯地區所傳送至台灣地區的暖溼空氣有逐漸減弱之趨勢。另由 700 hPa 垂直速度場分佈（圖 2-11）顯示，6 月 9 日至 10 日台灣地區均位於槽線前的不穩定區，並伴隨有很強的上升運動，且槽前的西南噴流仍然強勁。6 月 9 日 0800 LST 500 hPa 槽前的正渦度區（圖 2-12）位於台灣海峽及大陸東南沿岸，並持續朝東南方向移動，中層槽線發展深厚，可達大陸東南沿海及台灣海峽附近，至 6 月 10 日 0800 LST，正渦度區已南移至台灣地區。6 月 9 日 0800 LST 至 6 月 10 日 0800 LST 期間海峽至南海地區 300 hPa 風場則是呈現分流現象（圖 2-13）。

綜合以上初步分析發現，6 月 9 日至 10 日期間台灣地區有一梅雨滯留鋒面移入，鋒面結構發展完整，此滯留鋒面除提供 MCS 有利的發展條件，另位於南海地區持續生成及發展的對流雲系受到西南氣流導引，不僅將旺盛對流系統帶移至台灣地區，同時亦將暖溼空氣持續往台灣地區傳送，此為造成中南部地區豪大雨天氣主要的因素之一。而在這樣的大氣環境條件下，除受旺盛對流雲系移入台灣地區所造成的降水外，中央山脈地形舉升效應，也是激發台灣中南部地區對流降水的另一個重要因素。

由 850 hPa 的低層噴流顯示（圖 2-14），6 月 9 日及 10 日 0800 LST 均有一強勁的噴流軸自日本南方海面向西南延伸經過台灣中南部地

區，到達南海一帶。6月9日 0800 LST 位於台灣海峽南部之最大風速高達 40kt，10日 0800 LST 此地區最大風速更高達 45kt，且分佈範圍較9日 0800 LST 更為增大。700 hPa 的低層噴流軸分佈則較 850 hPa 略為偏高，此時噴流軸含蓋台灣地區，而6月9日 0800 LST 位於台灣海峽南部之最大風速已達 45kt，10日 0800 LST 低層噴流明顯增強，位於海峽最大之風速高達 55kt。綜合以上 700-850 hPa 低層噴流的分析可以發現，6月9至10日位於梅雨鋒面南側之強勁噴流，適時提供鋒面上充沛之暖濕空氣，為本次自南海至台灣地區中尺度對流系統的重要激發機制。

由於在南海和台灣之間，不斷有中尺度對流雲簇發展，並多呈胞狀，向東北移動影響台灣中南部地區，造成台灣地區豪大雨的發生。圖 2-15 為 6月8日 2000 LST 海峽南部區域（116-120E；20-24N）平均位溫（ θ ）與相當位溫（ θ_e ）的垂直分佈，圖中顯示，近地面層的 θ_e 高達 360 K，並隨高度迅速遞減，至 700 hPa 時約略降至 330 K，但 θ 仍隨高度增加，顯示在 700 hPa 以下為一條件性不穩定大氣，由於低層 θ_e 值明顯偏高，亦顯示出低層大氣具有一暖溼的特性。另外由同一時間馬公探空曲線分佈（圖 2-16）顯示，當時的大氣的對流可用位能（CAPE）達 $1778 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，其值甚大，且低層亦有 35 kts 的西南噴流。透過上述分析，我們發現事實上在 6月8日 2000 LST，海峽南部地區已存在提供對流發展的有利條件。

由 925 hPa 水氣通量輻散場位於北緯 23 度的經度-時間分佈（圖 2-17）可以發現，自 6月8日 0800 LST 至 10日 2000 LST 期間有 2 波（圖中黑色虛）較強的水氣通量輻合移入台灣中南部地區（約位於 120E），第一波為 6月8日 2000 LST 自海峽移入，並於 6月9日 0800

LST 達到 120E 時增強，通過移出後減弱。第二波緊接著第一波之後，於 6 月 9 日 1400 LST 在海峽有最強之水氣輻合，但在移入過程中有略為減弱，這一波在 6 月 10 日 0800 LST 達到 120E，移出後於 123E 又再度增強。在 6 月 10 日 2000 LST 之後，台灣地區僅有較弱的有水氣輻合量存在，而由雲圖及降雨量亦可以發現，在這個時間之後，主要的雲雨區均已明顯移出台灣東部外海一帶，因此台灣地區降雨現象明顯轉為緩和。

個案中，6 月 8 日鋒面位於台灣北部外海，9 日至 10 日逐漸南移至台灣本島中南部一帶，由於太平洋高壓勢力在個案末期逐漸東退，致使鋒面系統持續向東南移出(圖 2-18)。

從圖 2-19 垂直大氣環境條件上時間序列的分佈差異來看，無論從馬公探空站或屏東探空站均顯示：個案暖平流現象均相當顯著、維持時間長、冷空氣於 700 至 500 hPa 間、低對流層屬潛在不穩定的環境，最大相當位溫梯度以及水氣梯度均分布於 700 hPa 以下、無論是 LLJ 或 ULJ（高層噴流）均相當顯著，且於對流發展階段，中對流層相當乾燥。

9 日及 10 日高層槽線明顯落後低層槽線(圖 2-20)，槽線移動緩慢但較深，槽線底部向南延伸至華南一帶；由 500 hPa 高度槽及溫度槽分佈(圖 2-21)顯示，溫度槽明顯落後高度槽。綜合評估，個案系統垂直分佈具有顯著之斜壓特徵，溫度槽落後高度槽，系統有良好之垂直偶合特性，對於鋒面及其伴隨之 MCS 發展及維持提供有利的環境條件。

圖 2-22 顯示，2006 年環境場存在一鋒面系統滯留於台灣地區，該鋒面位置略為偏南，中高層槽線均落後地面鋒面位置，具有明顯之

發展中斜壓系統特性，且中層槽線發展深厚，地面系統位於 500 hPa 槽前之正渦度區內，且高層亦有一輻散場存在，且高層噴流之動力機制相當顯著，高低層系統垂直耦合良好(斜壓性較好)，低層輻合條件仍為個案中 MCS 發生之主要激發機制，環境之西南噴流同樣為鋒面帶上 MCS 發展帶來暖濕空氣，使得鋒面帶上之 MCS 得以不斷的生成發展。

緯度—時間的落雷頻率分佈圖顯示（圖 2-23）：自 12 日至 16 日止，共出現四波時間及空間尺度較大之對流系統。第一波在 12 日 0800 LST 前後，此波對流自北緯 24.2 度，東經 120.1 度附近隨時間往東南方移動，另一波緊接其後出現，其範圍約涵蓋北緯 24.2 度至 24.6 度，東經 120.5 度至 120.6 度之間，位置上並無顯著變化；第三波開始於 12 日 1800 LST 左右，自北緯 24.7 度、東經 120 度逐漸隨時間向北移動；最後一波深對流系統出現於 14 日 2000 時，位置並未隨時間產生明顯變化，空間分佈於北緯 24.1 至 24.4 度、東經 120.5 至 120.9 度之範圍內。由此可見，個案鋒面上所發展出來之對流系統除了上述四波外，在空間尺度上呈現較小的特徵，時間持續也不久。

配合經度—時間的落雷頻率圖（圖 2-23）分析後可發現：自 6 月 9 日 1100 LST 起，一直到 11 日 0800 LST 止，在北緯 22—24 度、東經 118—121 度範圍內出現空間尺度及時間尺度兼具的深對流系統，並伴隨有高頻率的落雷反應，且自 10 日 0000 LST 起，此深對流系統有顯著向東南移動的情形，此種落雷的變化正與前述雷達資料的分析一致。

自 6 月 9 日台灣海峽中南部之對流雲帶就持續移入台灣中南部地區（圖 2-24），造成該區域出現超大豪雨現象，直至隔日 0100 LST

降雨才稍緩；然隨後再海峽南部地區又激發出另一波對流系統，並移入台灣地區。10 日上午，此帶狀對流區域逐漸往巴士海峽移動，台灣地區降雨強度減弱，大範圍雨區仍涵蓋全台各地。

整體而言，就降水特徵來看，個案主要降雨區域在於中部及南部山區，其中在中部及高屏地區降水最大處多集中在山區，在嘉南地區降水山區則大於平地，最大降雨區亦出現於屏東山區，最大日降雨量為 718 mm，對流運動於滯留後南移並減弱，對流程度亦屬劇烈型降雨，持續時間較短（3 天），但降雨過程較為連續，日夜變化較不顯著。

劇烈降雨前，反應在環境量場以及系統本身的變化與趨勢，均存在有顯著的關鍵訊號。根據上述診斷量場分析，完成臺灣地區梅雨鋒面劇烈降雨檢查表（圖 2-25），並透過本研究個案進行校驗分析，滾動式修正，嘗試找到關鍵的有效閾值。研究也發現，當滿足 8 項或以上的項數個案，肇致豪大雨現象機會相對提高，所對應的坡地災害肇生機率也相對增加。參考 Wilks（2011）技術得分計算，為評估綜觀環境條件各檢查滿足項目對於預報災區強降雨的預兆得分(Threat Score, TS)，設定觀測雨量門檻值，且設定目標災區中有任一測站達強降雨標準，即視為滿足強降雨發生。將各項目檢查預報結果與實際觀測資料分別進行比對，利用誤差矩陣判斷各次評估之準確率，誤差矩陣可分為 4 種情境，分別為滿足，有預測/有發生(hits)、滿足，有預測/無發生(misses)，無滿足，無預測/有發生(false alarms)，無滿足，無預測/無發生(no events)。故可利用其分類結果，進一步計算可偵測率(Probability of Detection, POD)、誤報率(False Alarm Ratio, FAR)以及預兆得分(Threat Score, TS)等三種評估指標，藉以掌握可靠性較高

且滿足土砂災害事件肇生的綜觀環境條件關鍵因子，可適時回饋於災區強降雨發生與否的預報決策參考。

從整體分析結果來看(圖 2-26)，在土砂災害案例發生前 6 小時、前 12 小時及前 24 小時的 TS 值，分別為 0.65、0.58 及 0.51，顯示就整體統計分析來看，TS 愈接近 1，累積降雨量門檻是具有預報技術能力。BS 值分別為 1.42、1.42 及 1.82，當 BS 大於 1，代表有過度預報情事，可以進行適度修正。顯示預報極端劇烈降雨事件時，預報人員對於天氣系統強度的掌握普遍都有高估的趨勢。POD 值在土砂災害事件發生前 6 小時、前 12 小時及前 24 小時均為 0.96，根據經驗，POD 愈高，代表預報技術愈好。FAR 值分別為 0.33、0.33 及 0.48，當 FAR 得分愈低，表示錯誤預報愈少。這也突顯在整個運動及發展過程中，仍存在有相當程度的不確定性。

另一方面，從土砂災害事件發生前 6-12 小時，無論是在可偵測率、誤報率或是預兆得分上，綜合整體的預報表現成效最佳，適可提供防災應變前置預警整備的重要參考資訊；就防災應變的資料判讀、決策擬定與信心下達而言，此階段的檢查執行效益表現具有相當程度的參考價值。

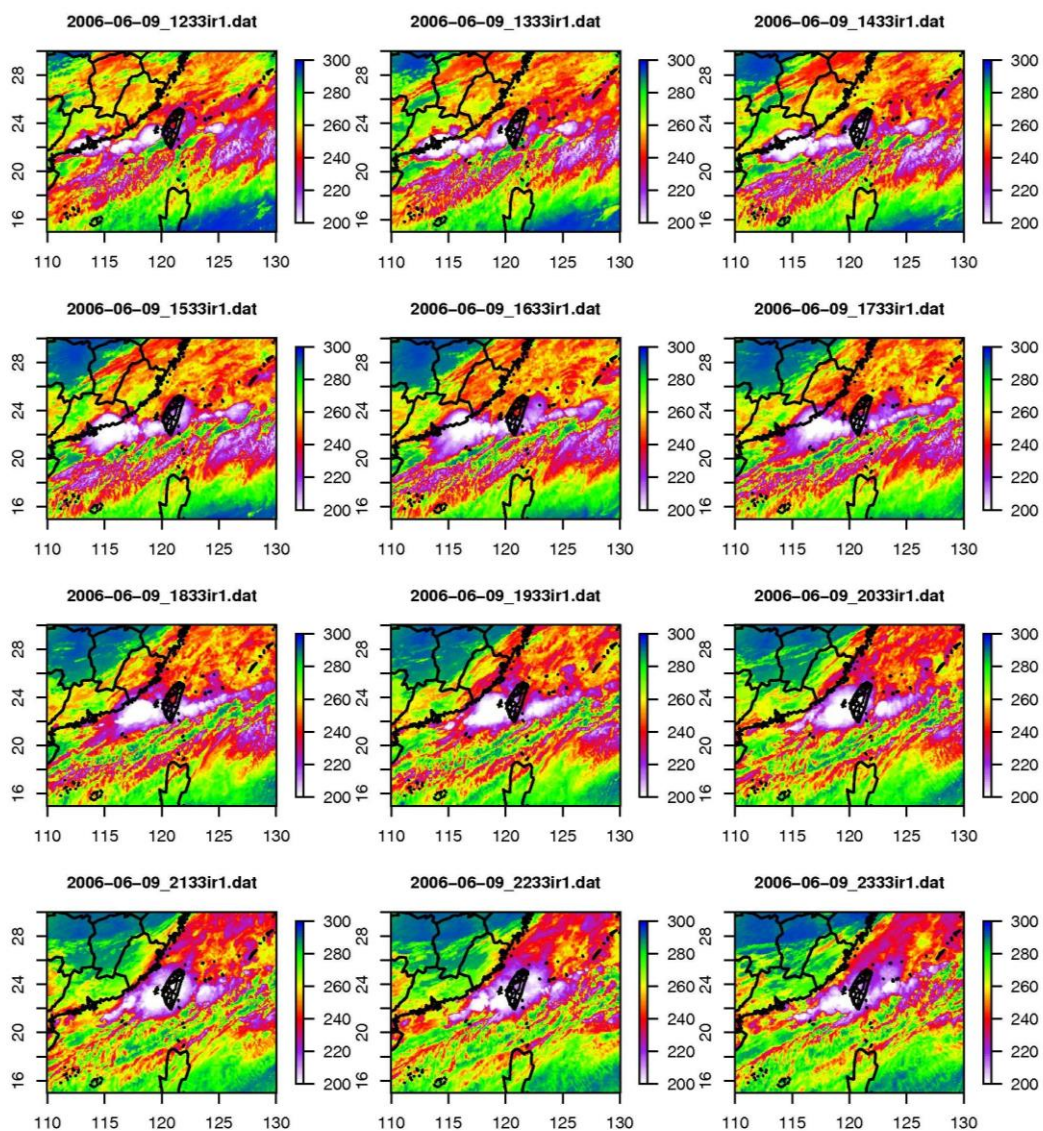


圖 2-5 透過衛星雲圖中雲頂溫度及其所涵蓋的雲系面積，進一步來
分析劇烈降雨天氣系統的時空分佈及發展演變過程

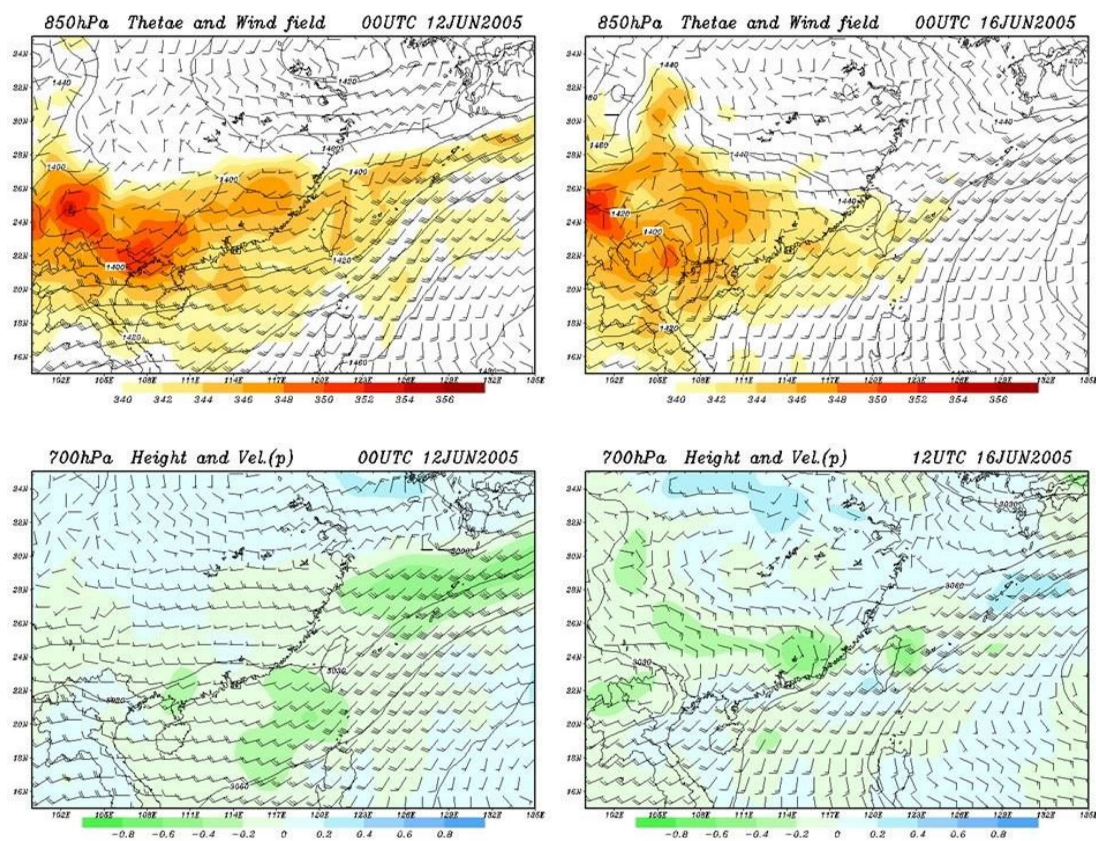


圖 2-6 NCEP/DOE Reanalysis-I 經緯度網格分析場資料

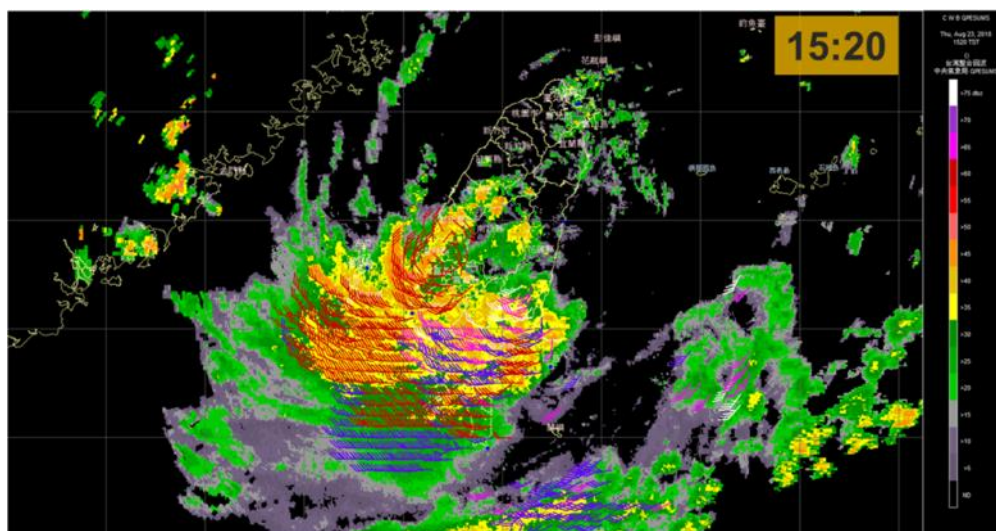


圖 2-7 中央氣象局劇烈天氣監測系統(QPESUMS) 資料

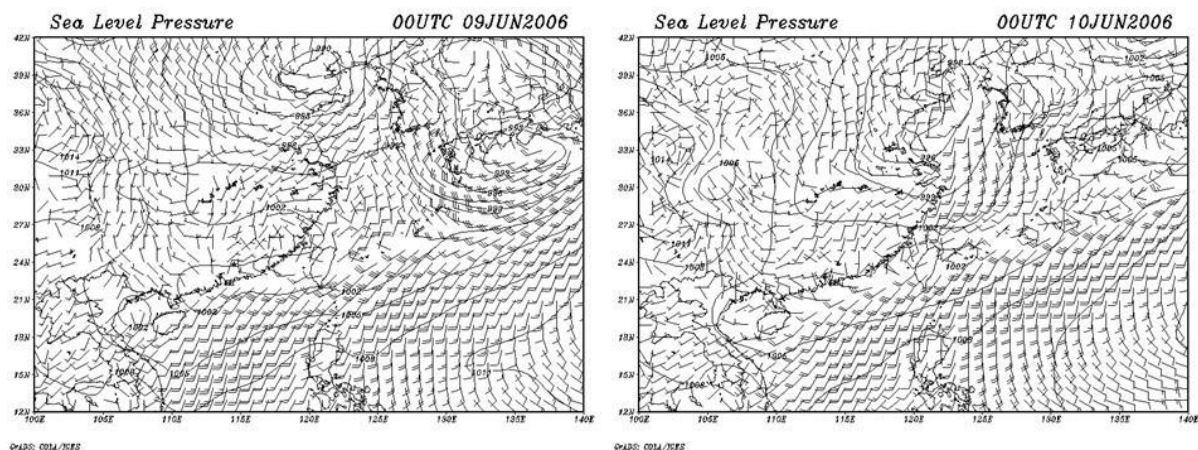


圖 2-8 2006 年 6 月 9 日及 10 日 0800 LST 海平面氣壓及風場

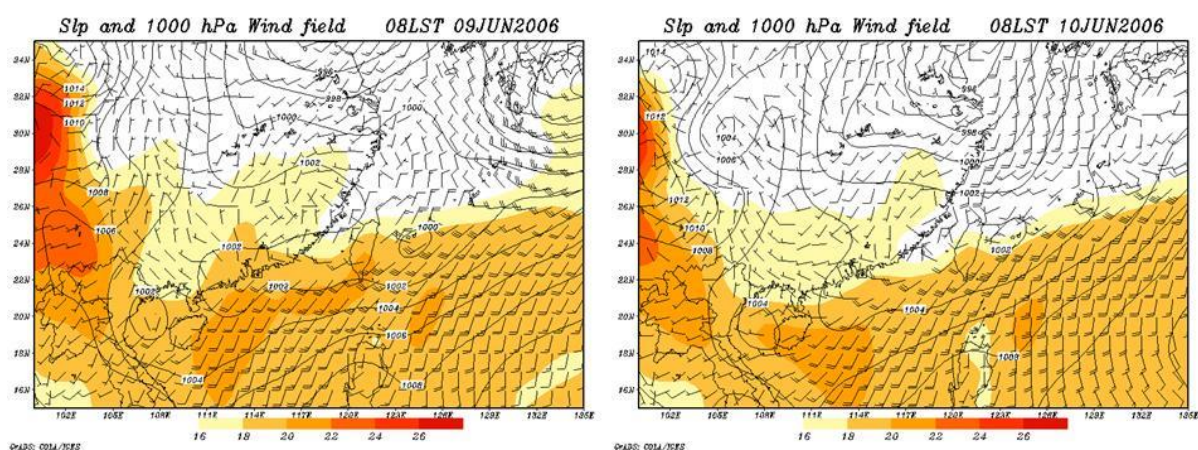


圖 2-9 同圖 2-8，但為海平面氣壓及 1000 hPa 的風場及比溼分佈

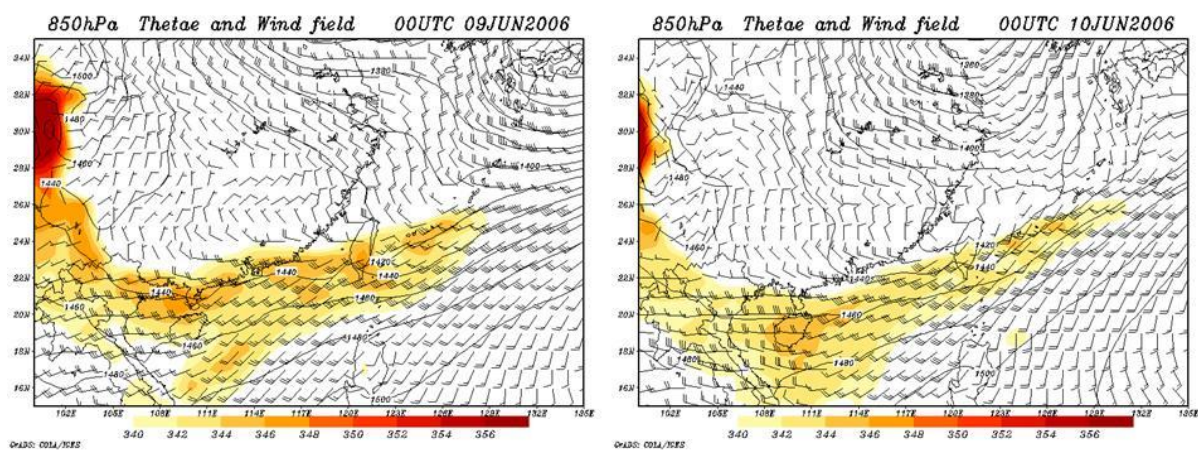


圖 2-10 同圖 2-8，但為 850 hPa 的風場、高度場及相當位溫分佈

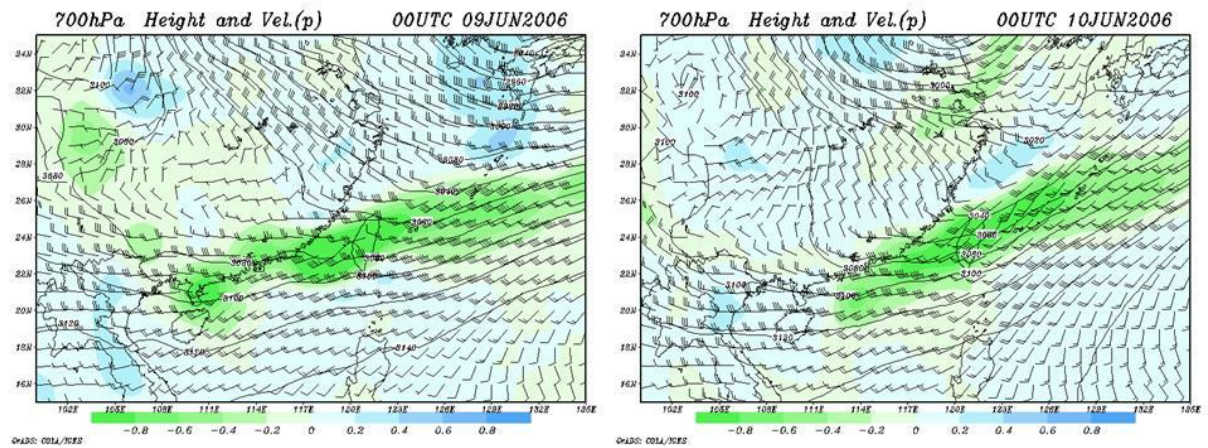


圖 2-11 同圖 2-8，但為 700hPa 風場、高度場及垂直速度分佈

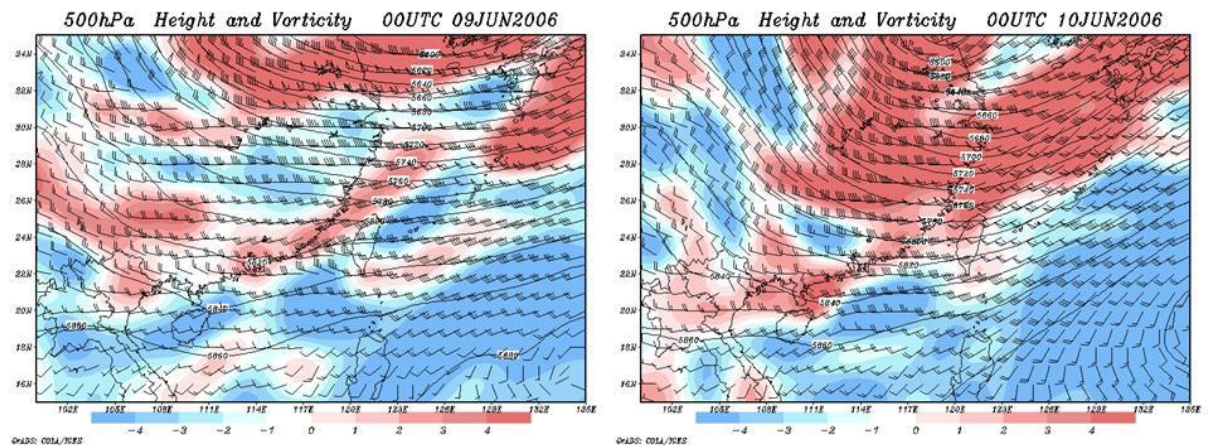


圖 2-12 同圖 2-8，但為 500hPa 風場（全桿與半桿風標分別表示風速為 5 與 2.5 m s^{-1} ）、高度場(實線，間距為 20 gpm)及渦度場（色階區，間距為 10^{-5} s^{-1} ）分佈

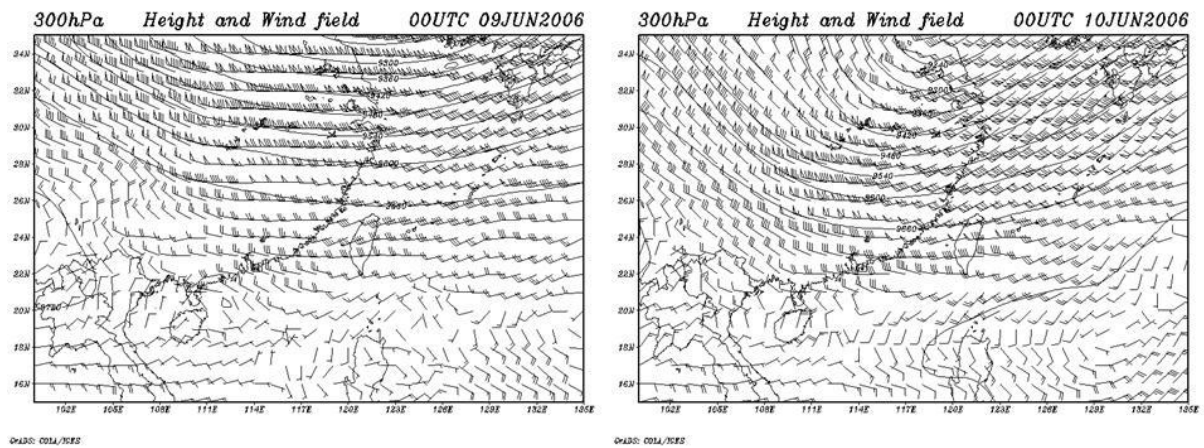


圖 2-13 同圖 2-8，但為 300 hPa 風場（全桿與半桿風標分別表示風速為 5 與 2.5 m s^{-1} ）及高度場（實線，間距為 60 gpm）分佈

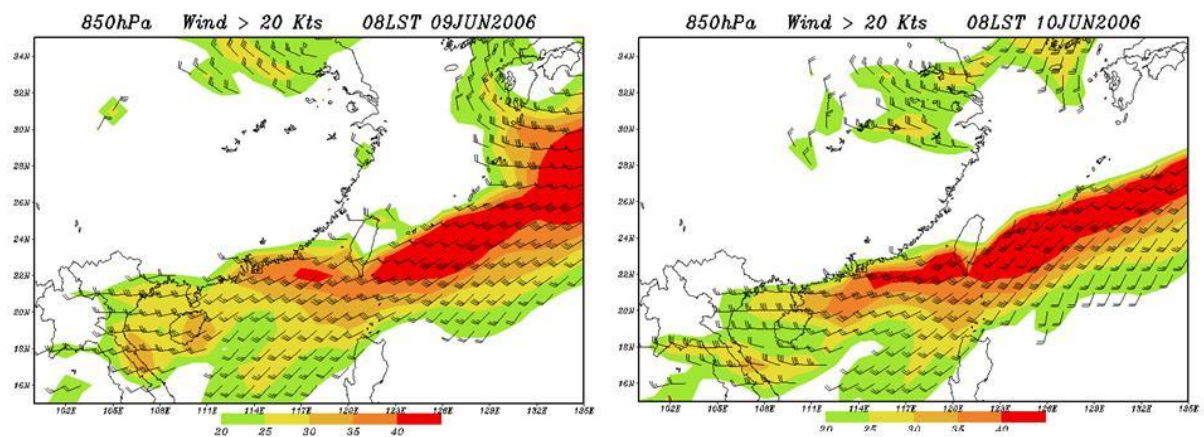


圖 2-14 同圖 2-8，但為 850hPa 風速大於 20 kt 區域（色階區）分佈

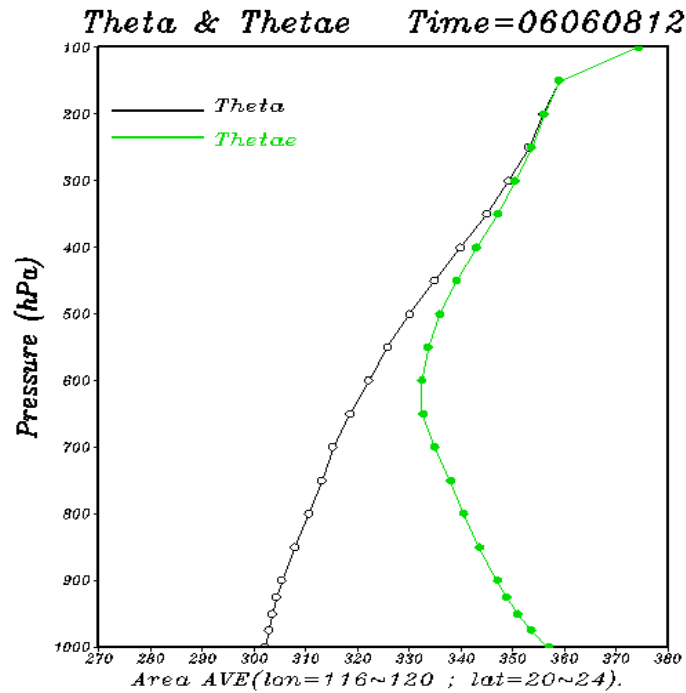


圖 2-15 2006 年 6 月 8 日 2000LST 之位溫 (θ) 與相當位溫 (θ_e) 分佈

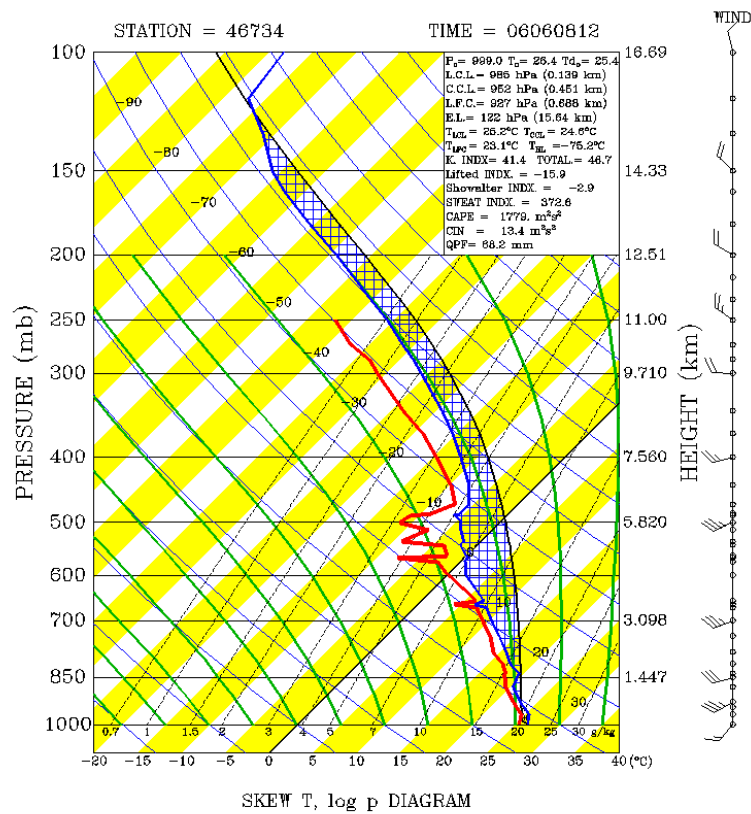


圖 2-16 2006 年 6 月 8 日 2000LST 之馬公探空測站斜溫圖

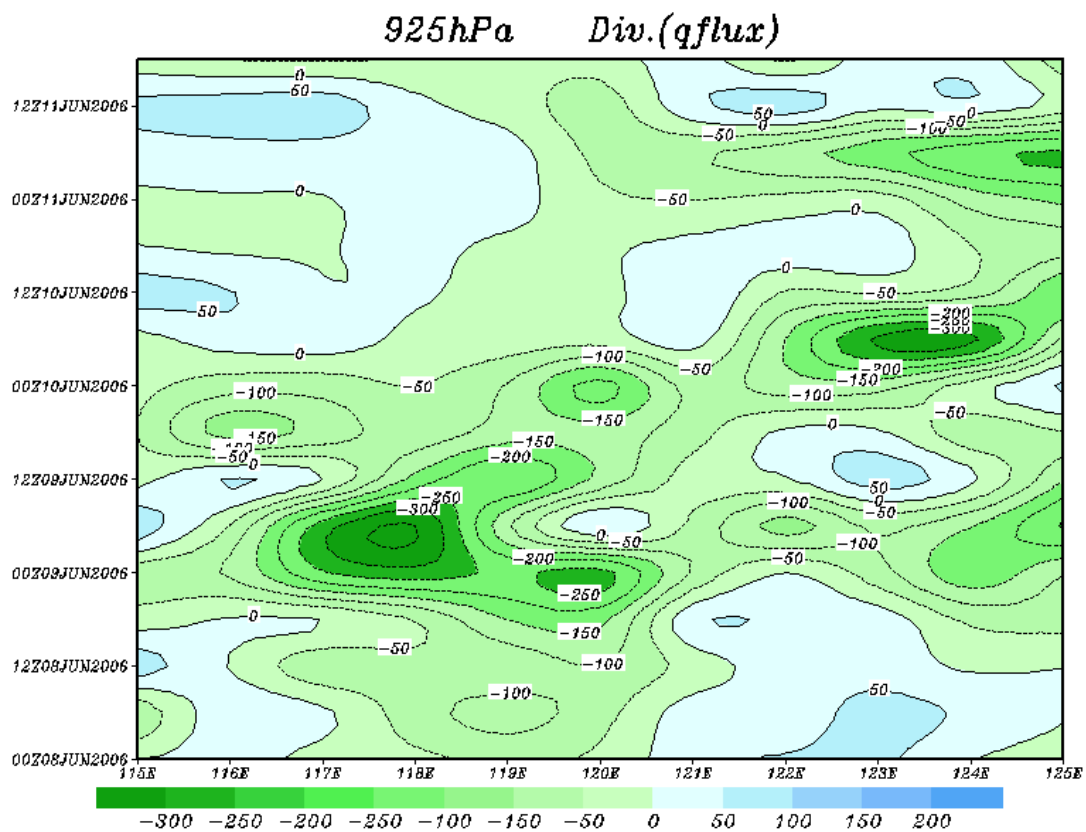


圖 2-17 2006 年 6 月 8 日 0000 UTC 至 11 日 1800 UTC 北緯 23 度之 925hPa 水氣輻散通量序列圖

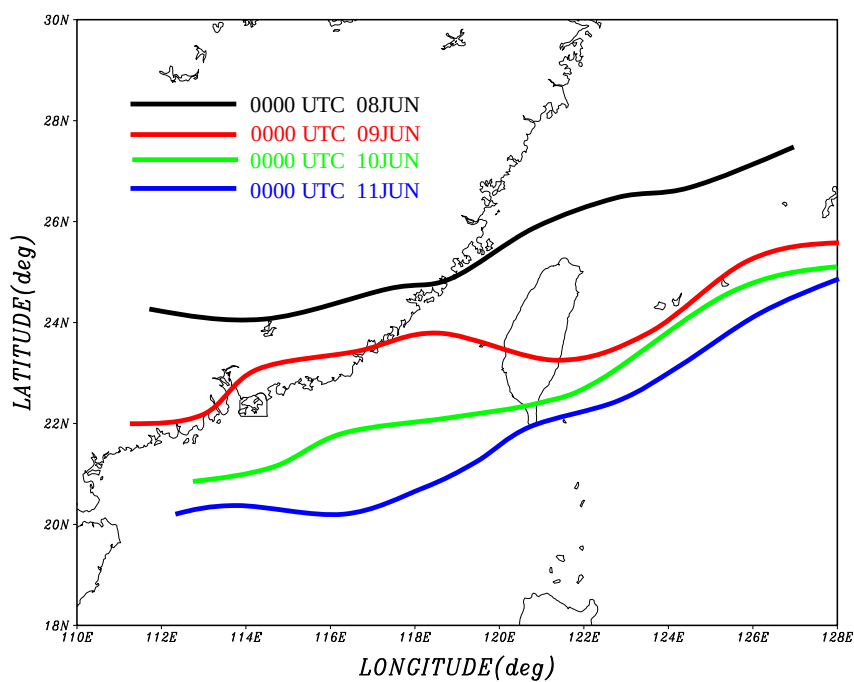


圖 2-18 2006 年 6 月 8 日至 11 日 0000 UTC 鋒面位置分佈

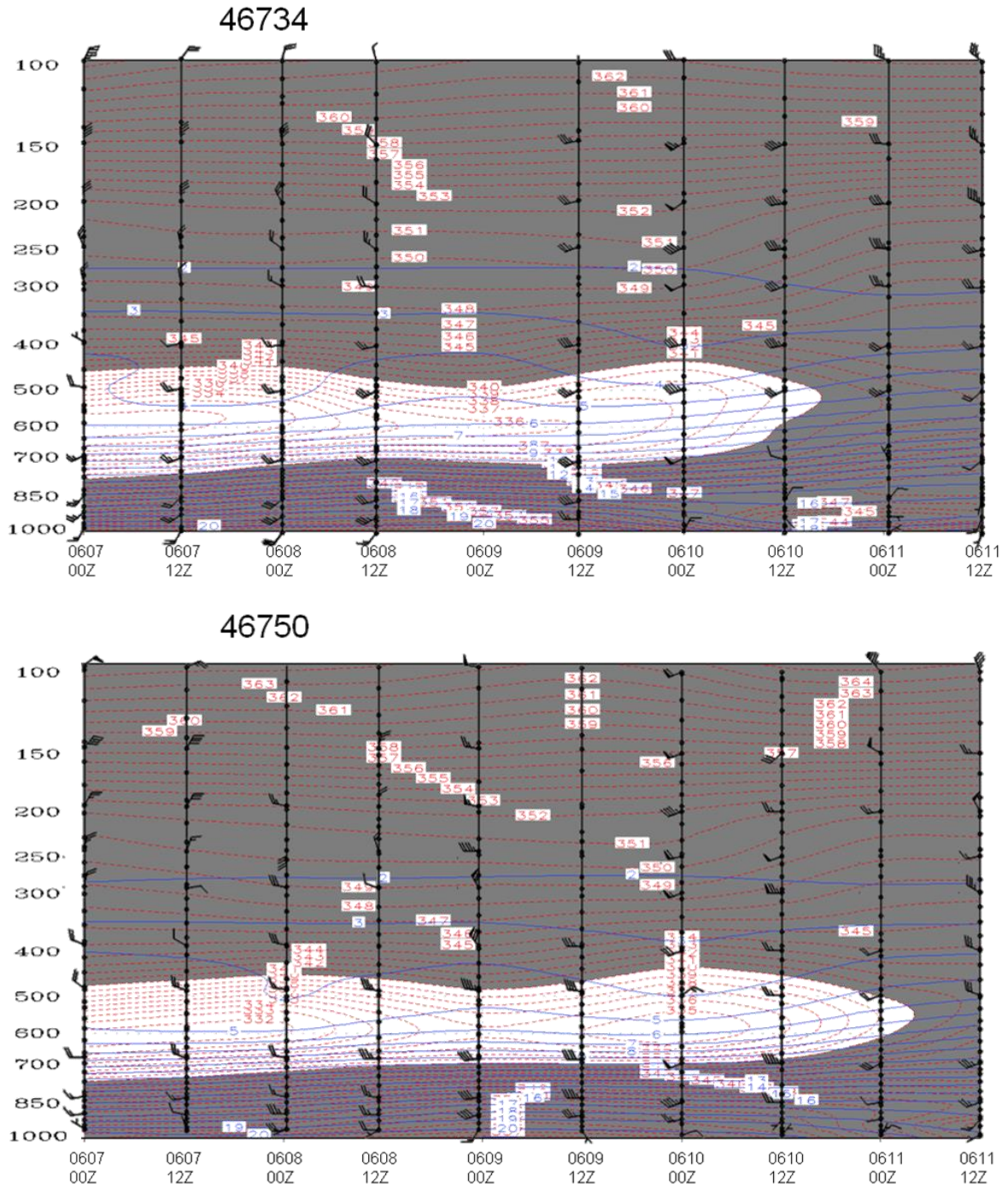
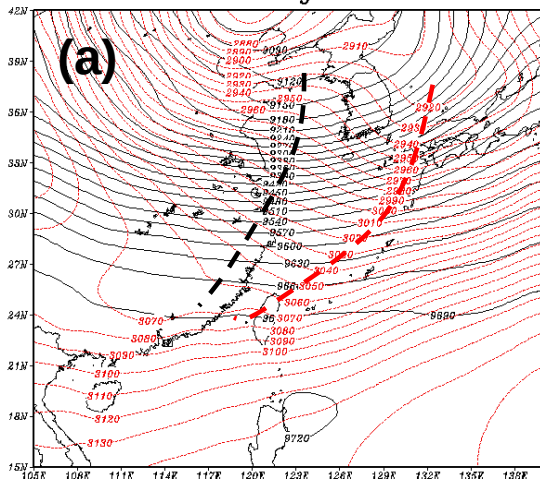


圖 2-19 研究個案之垂直大氣環境的時間序列分佈，紅虛線為相當位溫（單位為 K），實藍線為水氣（單位為 $g\ kg^{-1}$ ），色階區為相當位溫大於 340K 的區域；其中，46734 為個案馬公站，46750 為個案屏東站資料

300hPa and 700hPa height 00UTC 09JUN2006



300hPa and 700hPa height 00UTC 10JUN2006

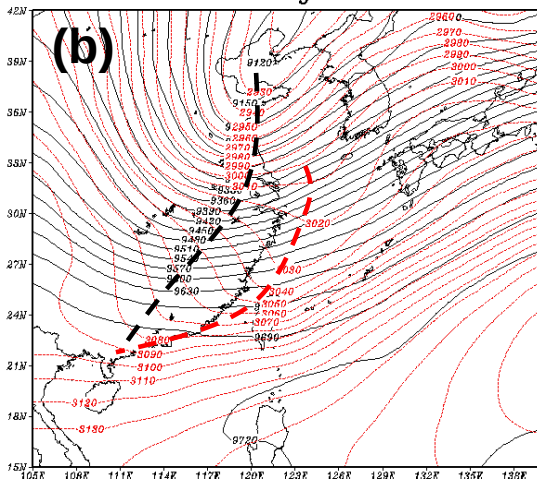
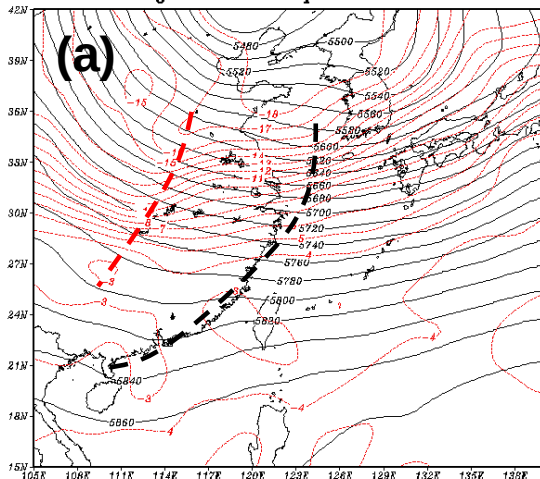


圖 2-20 2006 年 6 月 9 日及 10 日 0000 UTC 低層 700 hPa(紅色虛線為槽線)及高層 300 hPa(黑色實線為槽線)之高度場分佈

500hPa height and temp. 00UTC 09JUN2006



500hPa height and temp. 00UTC 10JUN2006

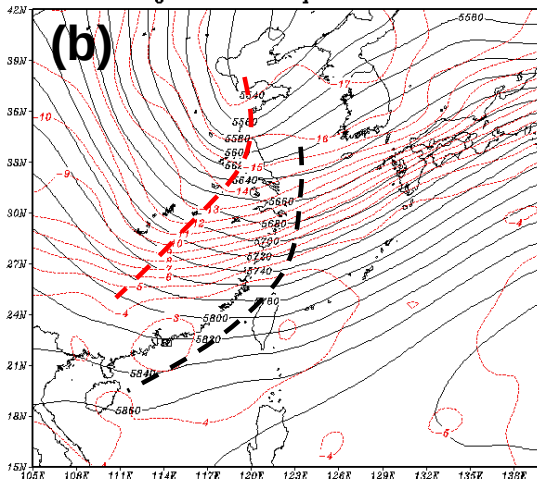


圖 2-21 2006 年 6 月 9 日及 10 日 0000 UTC 500 hPa 高度場(黑色實線為槽線)及溫度槽(紅色虛線為槽線)分佈

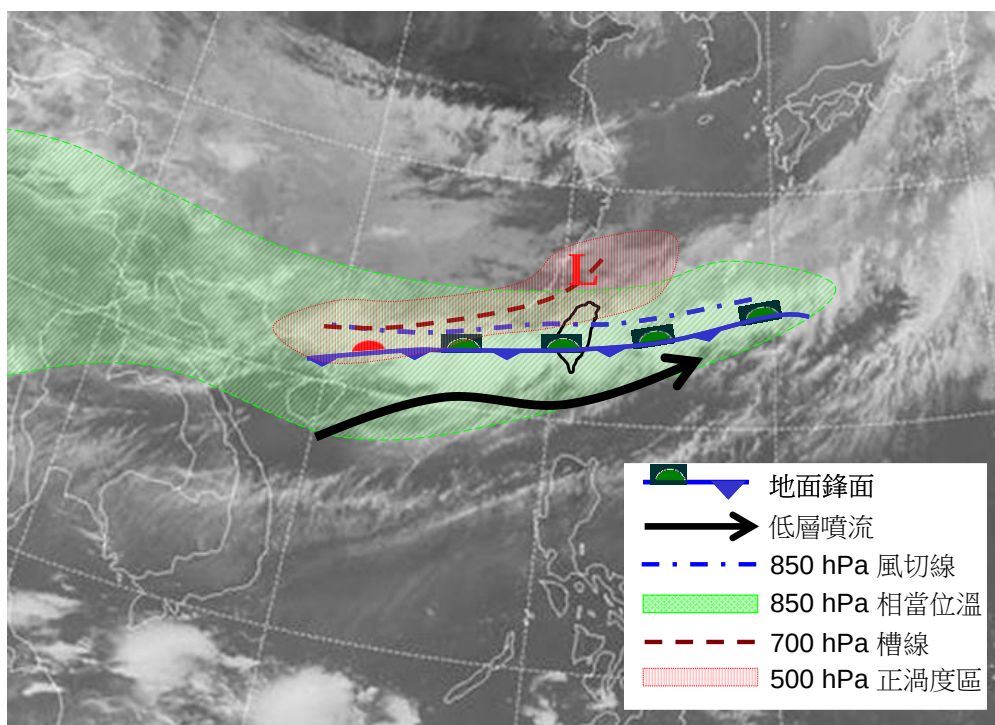


圖 2-22 個案所造成豪大雨事件之綜觀環境示意圖

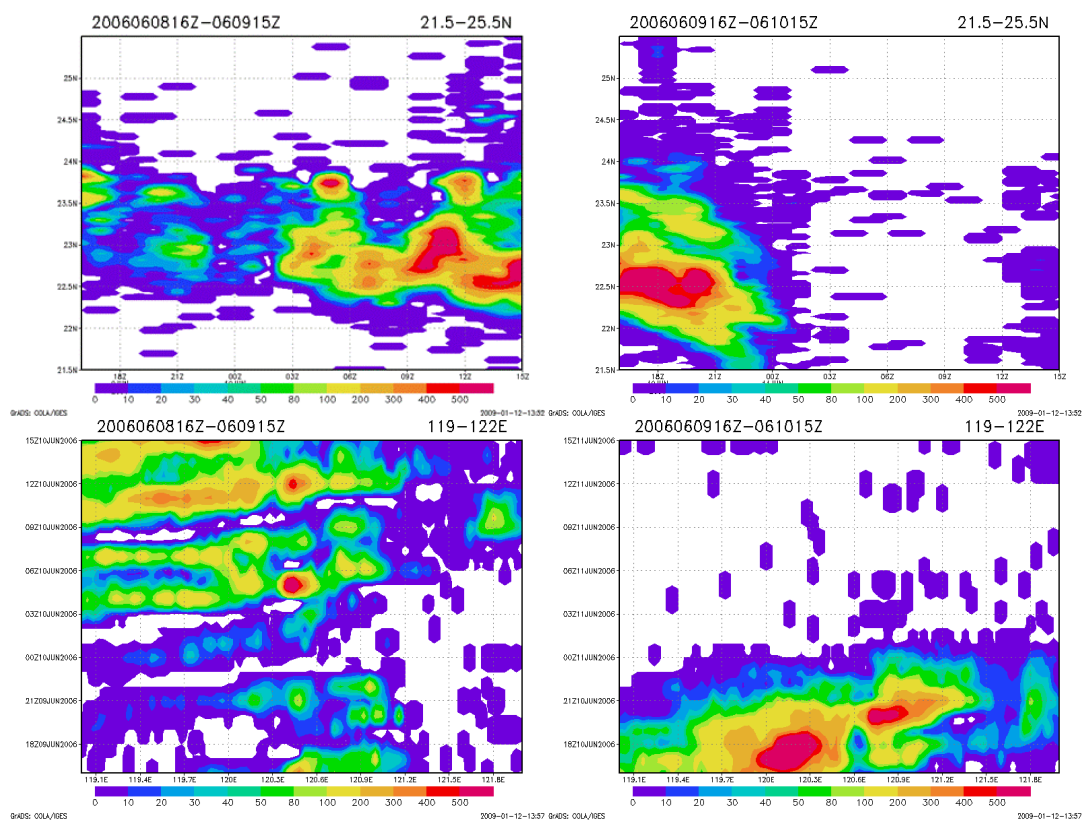


圖 2-23 上列 2 圖為 2006 年 6 月 9 日至 10 日，緯度—時間落雷
頻率分佈圖，下列 2 圖為經度—時間落雷頻率分佈圖

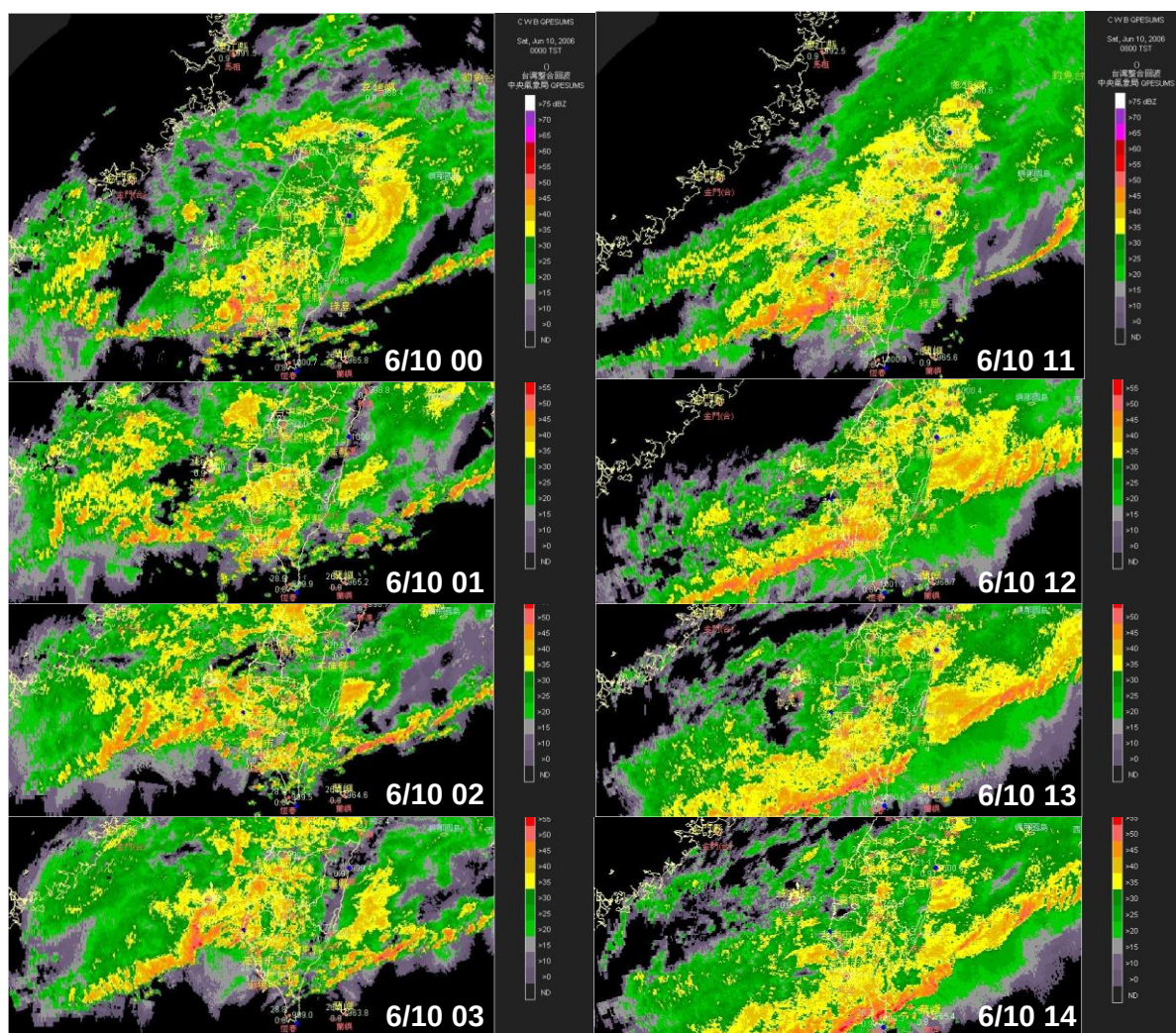


圖 2-24 中央氣象局劇烈天氣監測系統雷達產品顯示研究個案之
降水型態的差異

項次	層別	檢 查 項 目	0時	前6 小時	前12 小時	前24 小時	參 考 文 獻
1	低層	鋒面系統在 20-28N ⁰ 與118-124E ⁰ 間	●	●	●	●	林・2010
2	低層	22-28N ⁰ 與114-127E ⁰ 間， 850hPa有無風切線					林等・2008
3	低層	850hpa Θ_e 主軸指向台灣， 且高於340K以上					Chen, 2004
4	低層	850hpa 水氣通量大於 200gkg ⁻¹ s ⁻¹					張・2004
5	低層	850hpa 低層噴流 大於25kTs					陳・2007
6	中層	22-28N ⁰ 與114-127E ⁰ 間， 700hPa有短波槽					Chen, 2004
7	中層	700hPa相對濕度場 大於85%					Qian et. al., 2004
8	中層	500hPa渦度場有 大於 $5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 正渦度					林・2007
9	高層	200hPa 高層噴流 大於45kTs					林・2010
10	高層	200hPa 輻散場 風場分流角度 > 45°					林・2010

圖 2-25 個案研究彙整所得梅雨鋒面劇烈降雨之環境量場檢查表

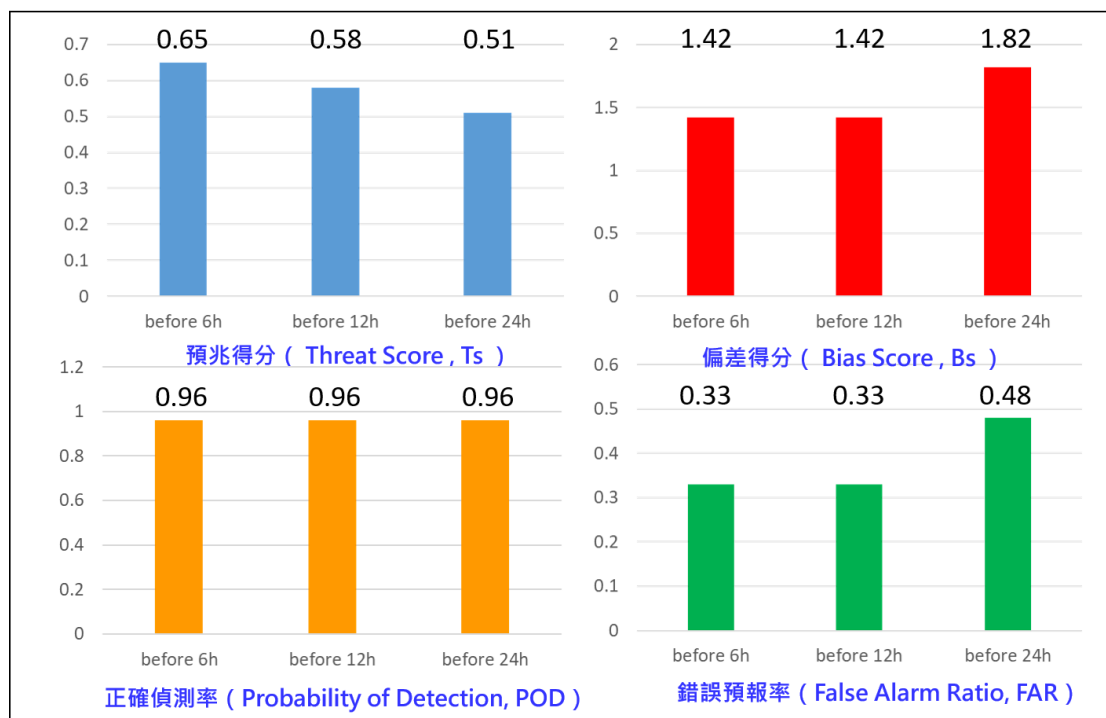


圖 2-26 整體技術得分計算結果（分別就土砂災害事件發生前 6 小時、前 12 小時及前 24 小時）

(2)運用高解析度模式進行模擬校驗，建置穩定可靠的梅雨鋒面強降雨綜觀環境診斷指標：

經由高解析度氣象數值模式 WRF 進行個案模式模擬，嘗試釐清梅雨鋒面前兆環境的關鍵變化，並有效回饋至防災預警的實際整備作業上。

研究使用的中尺度數值模式 WRF 進行個案模擬，初始資料來源為 NCEP(全名為 National Center for Environment Prediction)的 GFS(全名為 Global Forecast System)分析場資料，其中 NCEP GFS 的資料為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，10hPa 以下有 26 層，分別是 1000，970，950，925，900，850，800，750，700，650，600，550，500，450，400，350，300，250，200，150，100，70，50，30，21 以及 10hPa。

WRF 為新一代的中尺度數值模式，由 NCAR(國家大氣研究中心)發展，與聯邦航空管理局、奧克拉荷馬大學等大氣機構合作研發，此模式主要為完全可壓縮的非靜力穩定方程式。優點為計算的速度快，可以提供作為天氣預報；對於個案的研究探討 WRF 模式中有許多的物理設定可以選擇，公開使用至今，已有 MEFSEA(Mesoscale Ensemble Forecast for South East Asia)及防災中心等等作為預報之用。因為此模式具有許多的動力核心，可以透過平行的運算藉以模擬出真實的個案或是作為理想化的模擬實驗之用。模擬的網域大小(水平為經緯、垂直為 σ ($\sigma = P/P_s$)座標)、模式的各項物理設定及模擬的時間，皆可隨模擬的需求而有所變更。WRF 模式的初始場資料可以為 NCEP GFS 或是 CWB GFS 等，透過 WRF SI(WRF Standard Initialization)，選取網格範圍，以及多重巢狀可移動網格，然後將 NCEP GFS 內插至網格點上，並設定地形、土地利用資料等統計資料

後以 WRF 模式進行模擬計算。

WRF 模式輸出的部份可透過 RIP4、GrADS、NCAR Graphics、Vis5D 等繪圖軟體繪製氣象場各個變數來分析資料。另外，WRF 模式在產生初始資料的過程中，可以附加使用三維變分同化系統 (WRF3DVAR)或是四維資料同化(4DVAR)將觀測資料同化至模式中，以增進模式模擬的準確性，加入觀測資料之所以能改善模擬的結果，是因為加入的觀測資料能修正初始猜測(first guess)場，使模式大氣的初始場最佳化，進而影響模式的模擬結果(本研究未使用資料同化)。

由於此模式提供了許多不同的微物理法、積雲參數化法，因此可以適用於不同的天氣類型，而在 Chien et.al.(2004)中提到 WRF 在校驗定量降水時，發現模式的降水量受到積雲參數化法的影響， σ 垂直解析層為 31 層，分別為 1, 0.993, 0.98, 0.966, 0.95, 0.933, 0.913, 0.892, 0.869, 0.844, 0.816, 0.786, 0.753, 0.718, 0.68, 0.639, 0.596, 0.55, 0.501, 0.451, 0.398, 0.345, 0.29, 0.236, 0.188, 0.145, 0.108, 0.075, 0.046, 0.021, 0。

目前由於 WRF 氣象模式廣泛應用在各種中尺度的模擬上，其原本為定義為區域中尺度氣象模式，因此本研究將利用此 WRF 全球模式系統，進行 2006 年 6 月 8 至 11 日梅雨鋒面強降雨個案進行數值模擬，並經由靈敏度的設計與測試，瞭解梅雨鋒面前兆環境的關鍵變化，建置穩定可靠的梅雨鋒面強降雨綜觀環境診斷指標，研究結果將直接回饋於防災應變作業時的診斷評估，期能落實減災、防災與消災的最大效益。

模擬包括所有的物理過程，分別選用 RRTM 長波輻射及 Dudhla 的 Simple 短波輻射參數法，積雲參數化採用 KF scheme (Kain and

Fritsch, 1992 and 1993)，邊界層則採用高解析度 YSU scheme (Hong and Pan, 1996)，及雲物理參數化用 WSM5class scheme (Hong et al., 1998)。模式以美國 NCEP (National Center for Environmental Prediction) GFS Reanalysis II 全球模式分析場為初始場，積分 72 小時的數值預報。模式設計為三層巢狀網格，積分範圍如圖 2-27 所示，外層粗網格 (D1) 水平解析度為 27km，網格點數目為 300×200；中層網格 (D2) 水平解析度為 9km，網格點數目為 196×196；內層細網格 (D3) 水平解析度為 3km，網格點數目為 208×226，相鄰兩層網格間的資料可透過雙向交互作用(two-way interactive)互相影響。積分的時間步階(time step)為 15 秒，模式的側邊界使用開放邊界條件(open boundary conditions)，而上邊界則使用 Rayleigh damping。

研究中針對 2006 年劇烈降雨個案進行高解析度數值模擬，藉由模式模擬以探討分析梅雨鋒面及其伴隨 MCS 之結構特徵。透過模式模擬結果顯示，模擬 6 月 9 日及 10 日 0000 UTC 海平面氣壓風場(圖 2-28)與原先觀測分析結果相似，其間位台灣地區有一鋒面系統滯留。但在模擬亮度溫度與 IR 雲圖比對發現，6 月 9 日 0000 UTC 至 0600 UTC 模擬較有組織之對流雲帶分佈於台灣南部至巴士海峽一帶(圖 2-29)，而實際之鋒面雲帶則橫跨台灣地區(圖 2-30)，顯示模擬之鋒面雲帶位置明顯較實際雲帶偏南。6 月 9 日 1200 UTC 至 1800 UTC 由 IR 雲圖可以發現有一較強之對流系移入台灣中南部地區，模式雖有反應此一現象，但其強度明顯偏弱。6 月 10 日 0000 UTC 至 1800 UTC 由 IR 雲圖顯示，鋒面雲帶逐漸有台灣地區往南移動，並於 1800 UTC 時移出台灣地區，強度亦隨之減弱，而在模擬結果則顯示，10 日鋒面位置亦有逐漸南移並減弱之趨勢，但整體而言其位置較實際觀

測偏南，且強度亦較弱。

然而，模擬 6 月 9 日 0000UTC 及 10 日 0000 UTC 850 hPa 之風場及相當位溫(圖 2-31)顯示，其風切線位置自 9 日至 10 日期間有往南移動，9 日風切位置略較觀測偏高，10 日位置大致相符，但模擬之相當位溫分佈範圍及其強度均較觀測值偏強。在 700 hPa 高度場及垂直速度場分布(圖 2-32)亦模擬出 9 日 0000 UTC 及 10 日 0000 UTC 期間有一槽線正由大陸華南沿海逐漸移出，位於台灣位於槽前不穩定帶，台灣地區均有明顯之垂直運動分佈，其形態與觀測大致相似。在 500 hPa 之渦度分佈(圖 2-33)則顯示，9 日 0000 UTC 模擬之渦度帶已移入台灣地區，10 日 0000 UTC 該渦度區已移至台灣東部外海，相較與觀測情形發現，模擬之系統移動較快，且渦度值較大。在 300 hPa 模擬(圖 2-34)則顯示，風場分流所形成之輻散場位置較觀測情形偏南。至於低層噴流強度與分佈，於 9 日及 10 日期間模擬結果(圖 2-35)大致與觀測情形相近，僅模擬 9 日台灣地區之風速略高。

在降水部分，模擬 6 月 9 日與 10 日結果與實際累積降水比對發現，6 月 9 日模擬最大降水在南部及中部山區均有極值存在(圖 6-36a)，此一現象與觀測結果相同，但在強度部份，模擬結果明顯偏弱(模擬最大值為 450 毫米，實際為 717.5 毫米)。6 月 10 日模擬結果(圖 6-36b)亦與 9 日相似，其最大值亦分佈於中南部山區，平地累積降水相對較小，但總雨量較前一日弱，相較於觀測結果亦顯示降水分佈相似，但強度仍較實際偏弱。

比較 9 日至 10 日期間雷達觀測之降水回波(圖 6-37)與當時雷達觀測時間往後 3 小時之累積雨量(圖 6-38)比較顯示，6 月 9 日 0000 UTC 至 0600 UTC 期間台灣地區有較強之降水回波存在，其極值位於東部

及中南部至台灣海峽一帶，此時對應模擬 3 小時之累積降水顯示最強之降雨發生於中南部地區，尤其以山區最為顯著，但東部地區之降水模式掌握的並不理想。9 日 1200 UTC 中南部地區之降水回波略為減弱，模擬反應之降水現象亦明顯減弱。9 日 1800 UTC 至 10 日 0000 UTC 由海上移入之降水回波再次增強，其範圍更包含台灣北部地區，此時模擬之降水可以清楚顯示，9 日 1800 UTC 西部沿海至海峽上之降水增強，其位置與當時由海上移入降水回波位置相當，至 10 日 0000 UTC 台灣西部地區降水則明顯增強，反應降水回波移入所造成之降水現象。10 日 0600 UTC 至 1800 UTC 降水回波持續往南移動，強度並逐漸減弱，模擬亦可顯示台灣地區降水減弱之現象。綜合研究個案之降水模擬結果顯示，降水位置分佈除東部地區模式較無法掌握，其餘情形大致與實際觀測結果相符，惟降水強度明顯較實際情形偏弱。

為比較 WRF 模式模擬結果對於與 NCEP $1^0 \times 1^0$ 再分析觀測場資料之差異，且以風場及相當位溫代表大氣之動力場之熱力場。經由 850 hPa 高度之區域平均風速及相當位溫分析結果顯示：模式模擬的風速出現最大值模擬較 NCEP 分析值早，強度較弱，趨勢一致(圖 6-39a)，相當位溫模擬值較高，變動趨勢相同(圖 6-39b)。由以上結果可以發現，模擬結果動力場偏弱，但時間提早約 6 小時，熱力場則明顯偏高，但整體上變化的趨勢大致相同，顯示模擬對於系統有良好的掌握能力。整體來看，WRF 模式對 2006 年研究個案在綜觀環境的模擬與觀測結果大致相似，惟在風場模擬結果偏弱，時間提早約 6 小時，溫度場則明顯偏高。另外，在降水部份，模式對台灣地區降水分佈具有相當良好之掌握，惟降水強度明顯偏弱，且東部地區降水掌握相對較不理想。

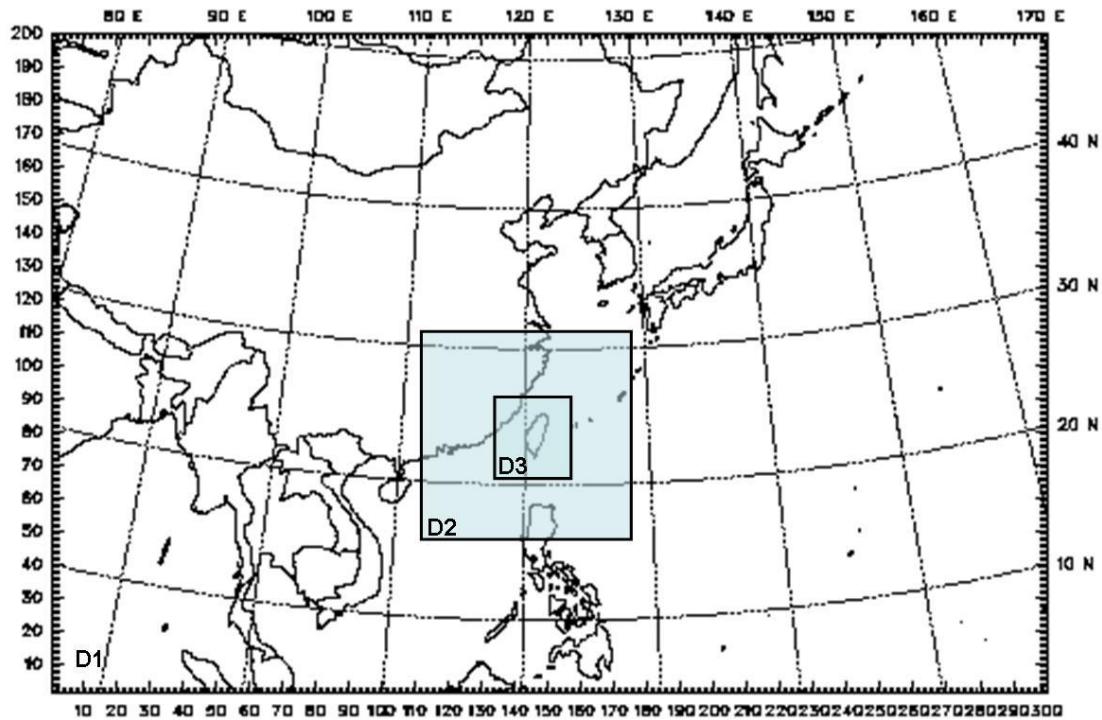


圖 2-27 模式設計三層巢狀網格，外層粗網格（D1）水平解析度為 27 公里，中層網格（D2）水平解析度為 9 公里，以及內層細網格（D3）水平解析度為 3 公里。

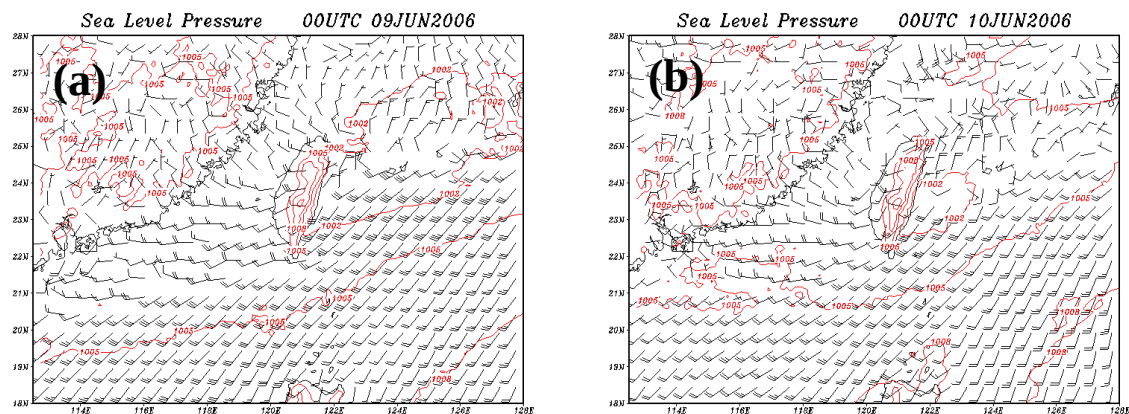


圖 2-28 2006 年 6 月(a) 9 日及(b) 10 日 0000 UTC 海平面氣壓（實線，間距為 3hPa）及風場（全桿與半桿風標分別表示風速為 5 與 2.5m/s）。

Brightness tmp. 09-0000UTC to 10-1800UTC JUN 2006

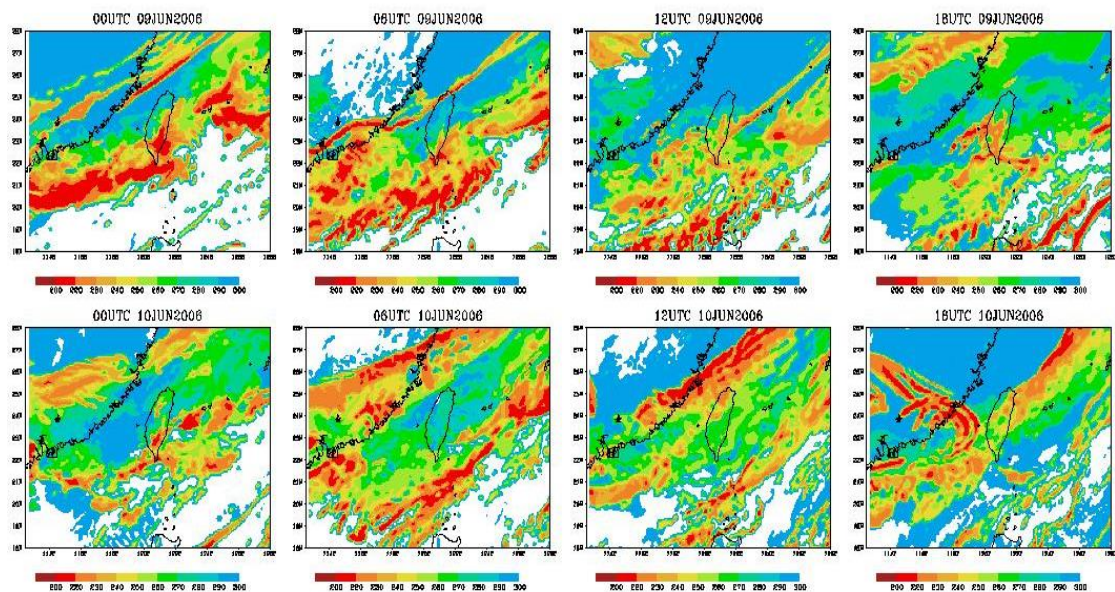


圖 2-29 2006 年 6 月 9 日 0000 UTC 至 10 日 1800 UTC 每時間間格六小時之亮度溫度(色階區，間距為 10K)。

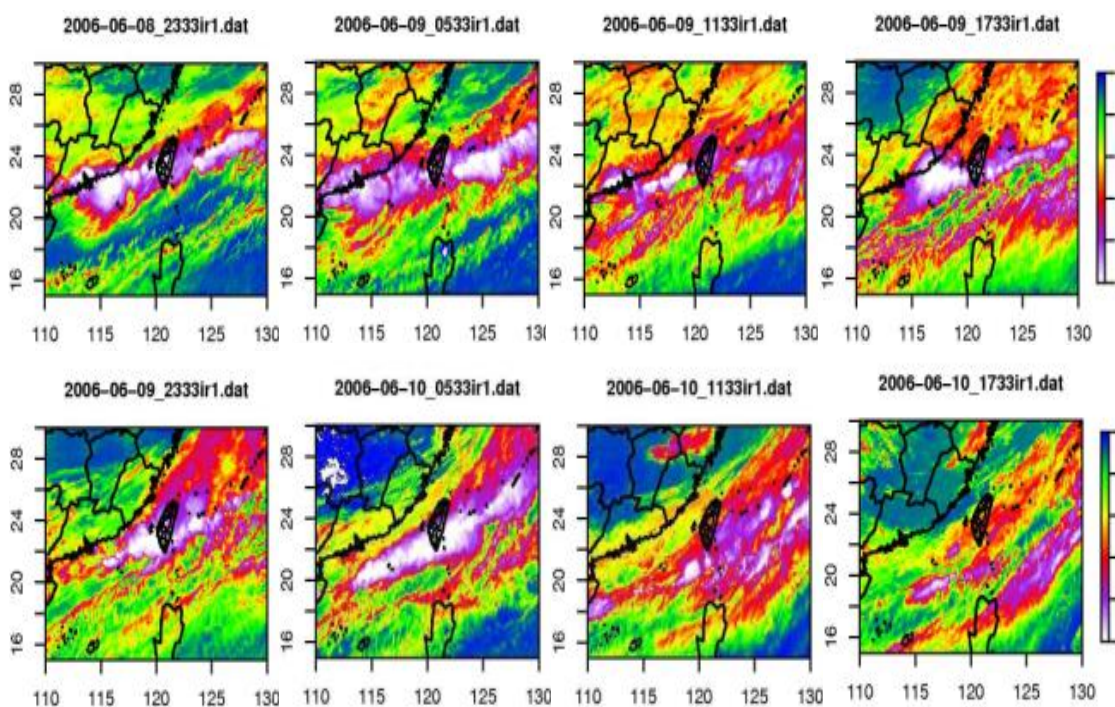


圖 2-30 2006 年 6 月 9 日 0000 UTC 至 10 日 1800 UTC 每時間間格六小時 IR 雲圖。

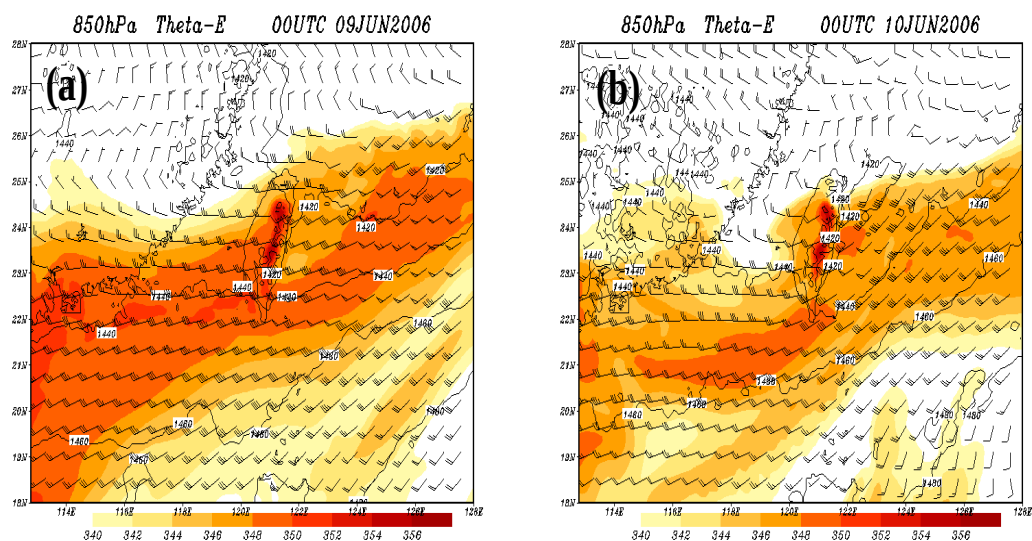


圖 2-31 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 850 hPa 的風場、高度場及相當位溫。

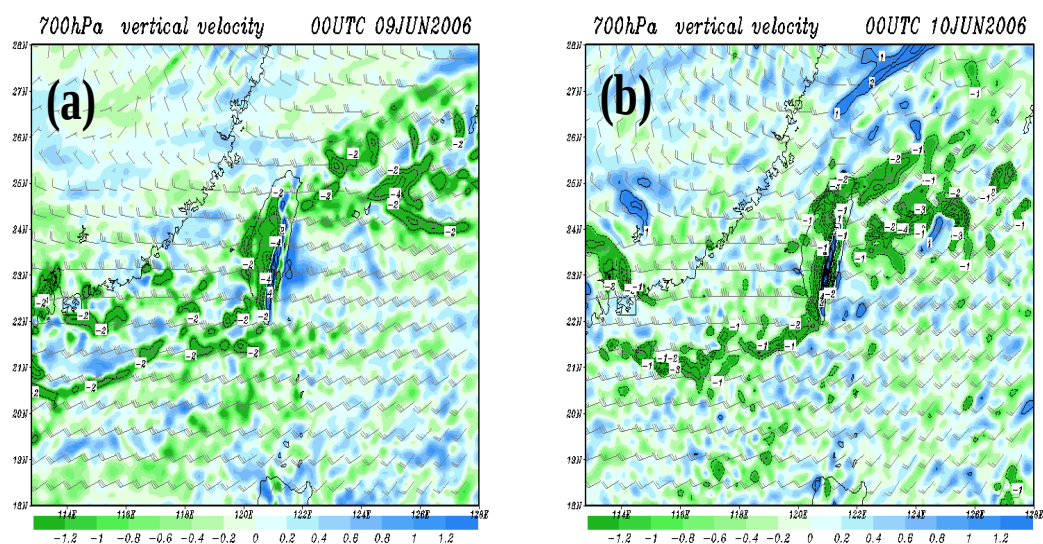


圖 2-32 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000 UTC 之 700 hPa 風場、高度場及垂直速度。

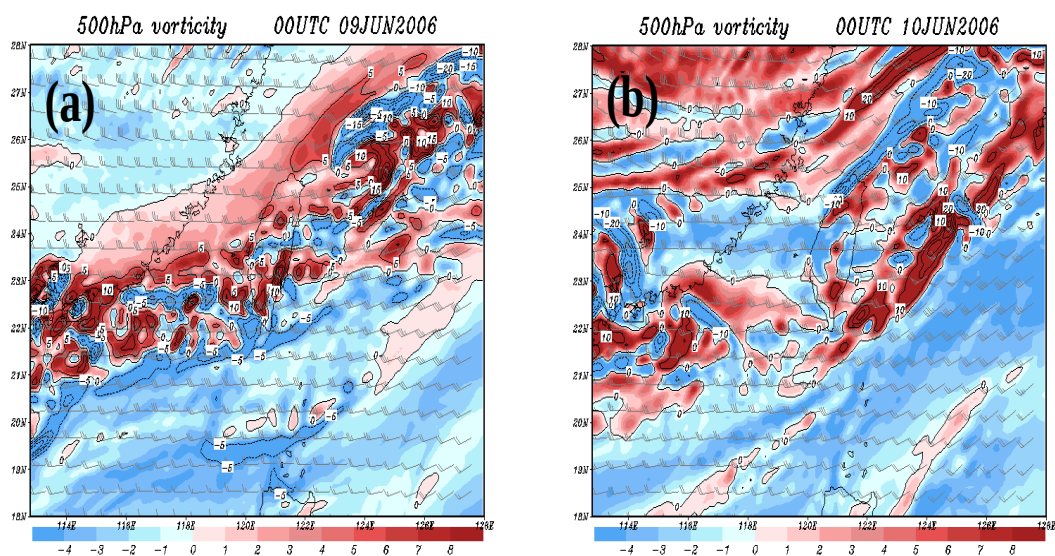


圖 2-33 2006 年 6 月(a) 9 日及(b) 10 日 0000 UTC 之 500 hPa 風場、高度場及渦度場分佈。

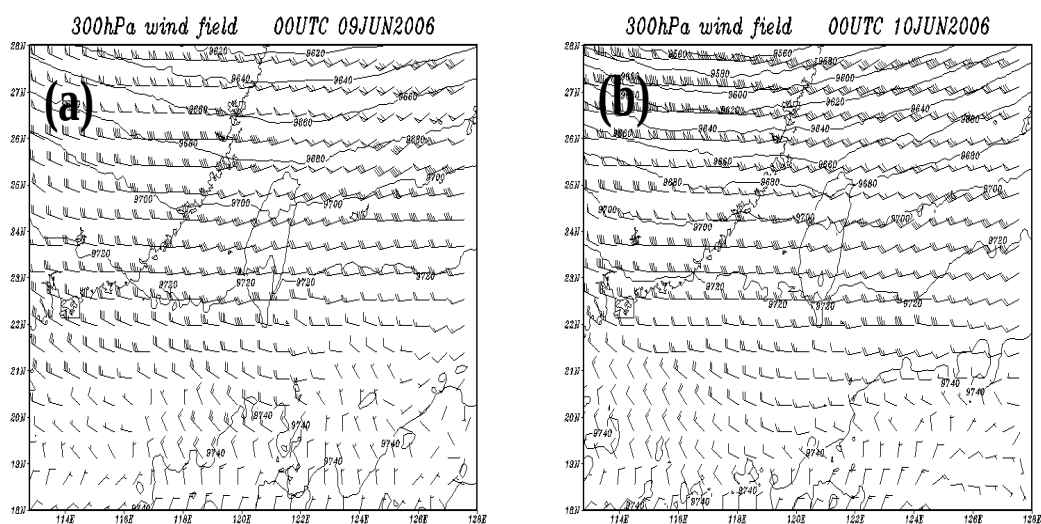


圖 2-34 2006 年 6 月(a) 9 日及(b) 10 日 0000 UTC 之 300 hPa 風場及高度場分佈。

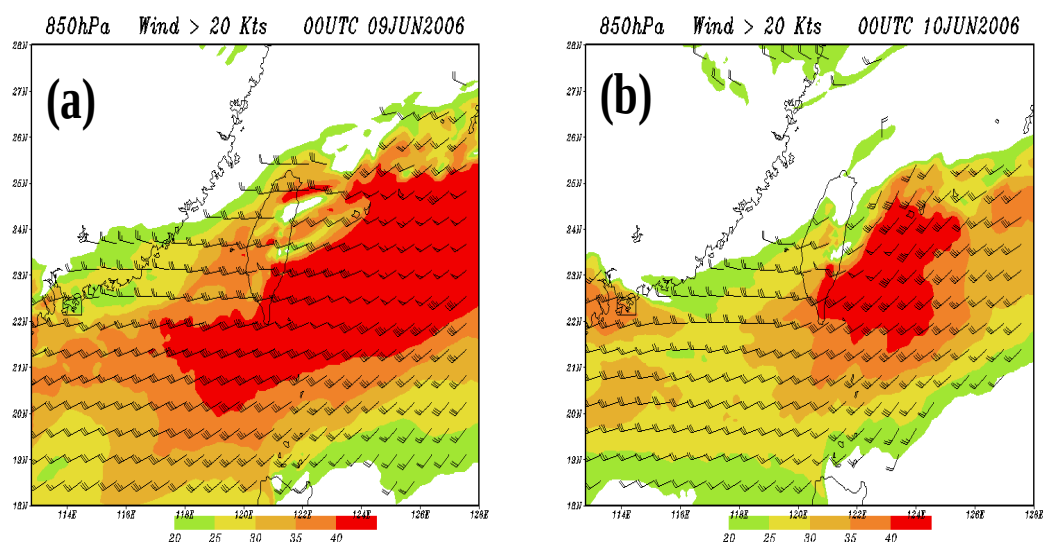


圖 2-35 2006 年 6 月(a) 9 日及(b) 10 日 0000 UTC 之 850 hPa 風速大於 20 kts 區域分佈。

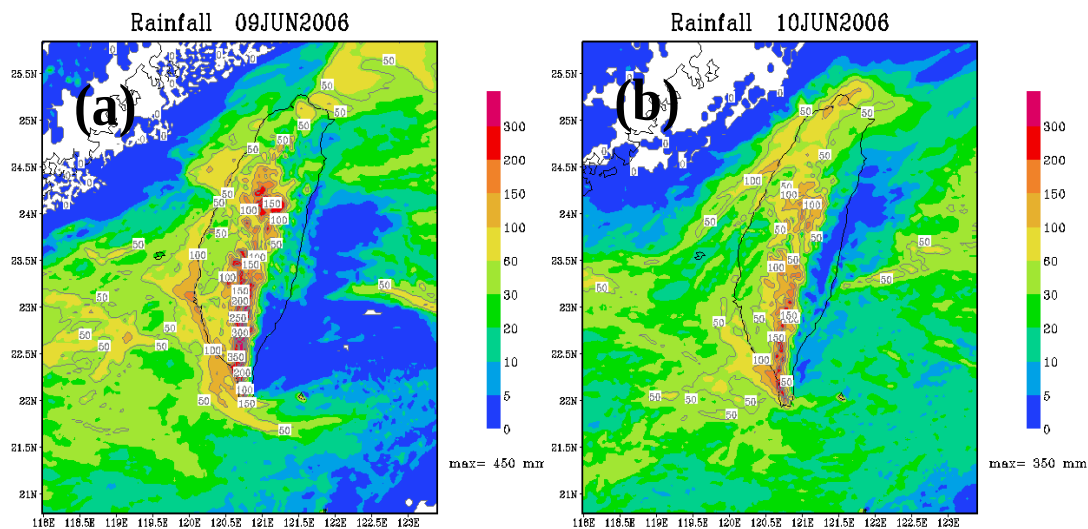


圖 2-36 WRF 模式(D3)模擬 2006 年 6 月 9 日及 10 日日累積雨量(雨量單位為毫米)。

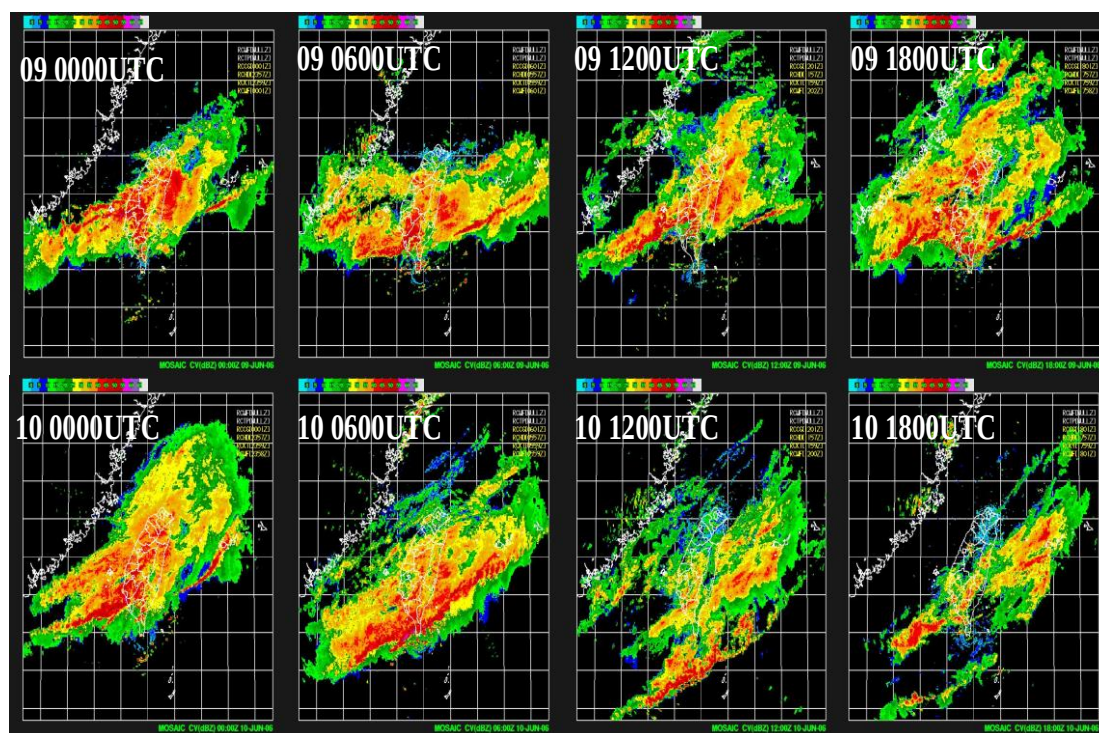


圖 2-37 2006 年 6 月 9 日 0000 UTC 至 10 日 1800 UTC 每六小時之整合雷達回波圖。

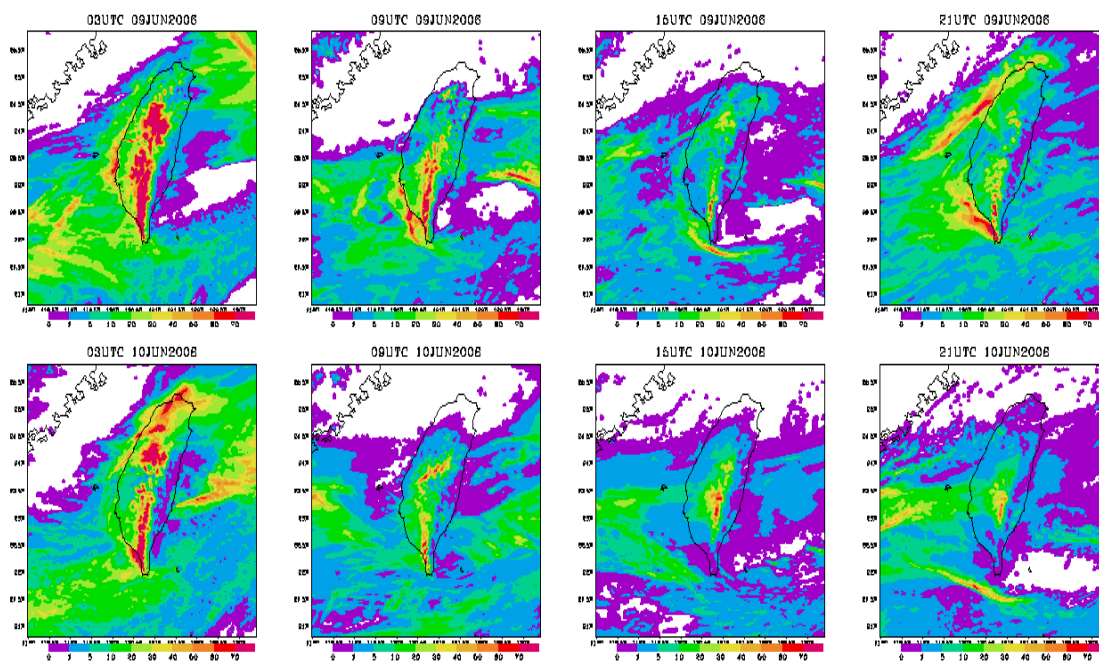


圖 2-38 WRF 模式(D3)模擬 2006 年 6 月 9 日 0300 UTC 至 10 日 2100 UTC 每三小時之累積雨量(雨量單位為毫米)。

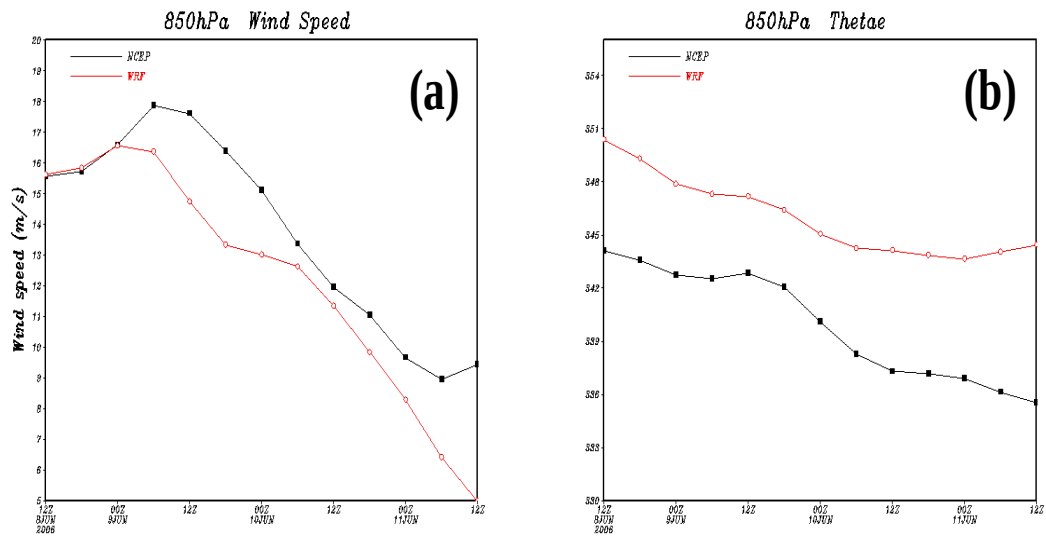


圖 2-39 2006 年 6 月 8 日 1200 UTC 至 11 日 1200 UTC，位於台灣上游區域平均(東經 114-120 度;北緯 19-25 度)之 850 hPa (a) 風速(單位為)及(b)相當位溫(單位 K)時間序列(黑色線為 NCEP 資料，紅色線為 WRF 模擬結果)。

為能釐清潛熱釋放對於伴隨梅雨鋒面之 MCS 的發展與維持過程中所扮演的角色，在研究計畫中，進行模式積分時，規劃設計靈敏度測試，執行關閉潛熱釋放實驗(即無潛熱釋放模擬，後稱 FDR)與控制實驗(後稱 CNTL)的校驗比對。

模擬結果顯示，2006 年 6 月 9 日 0000 UTC 至 10 日 0000 UTC 期間對流雲系仍分佈於台灣至海峽南部一帶。在 FDR 實驗模擬 850 hPa 之風場及高度場(圖 2-40)仍可見，9 至 10 日位於台灣至海峽南部地區之高度場較 CNTL 實驗結果明顯偏高，該區域之風速較弱。在 850 hPa 低層噴流分佈(圖 2-41)顯示，相較於 CNTL 實驗結果，在鋒面前緣之噴流強度仍明顯較弱。而在台灣上游區域(東經 114-120 度；北緯 19-25 度)平均 850 hPa 風速時間序列(圖 2-42)亦可以清楚顯示 FDR 實驗較 CNTL 實驗風速值弱，在對流發展期間(10 日 1200 UTC 前)，風速差值仍較大，當對流減弱後，風速減小且模擬之差值亦相對減小。另外，比較 850 hPa 高度場(圖 2-43a)及海平面氣壓(圖 2-43b)時間序列可以發現，FDR 實驗無論在高度場及氣壓場均較 CNTL 實驗高，10 日 1200 UTC 後，對流系統減弱，差值減小。另外，經由表 2-1 比較 2006 年 6 月 8 日 1200 UTC 至 11 日 1200 UTC 期間 NCEP 分析場、CNTL 實驗及 FDR 實驗之海平面氣壓、850 hPa 高度場及風速差異仍可以發現，CNTL 實驗模擬在海平面氣壓、850 hPa 高度場及風速均與 NCEP 分析場相近，變動趨勢亦相同；而 FDR 實驗模擬海平面氣壓及 850 hPa 高度場較 CNTL 實驗模擬高，但 850 hPa 風速的表現較小。在 MCS 發展最強盛時期，潛熱釋放所造成的效應，反應在海平面氣壓、850 hPa 平均高度及風速的改變量上，均有相當程度的貢獻。

綜合以上分析資料可以發現，在無潛熱釋放(FDR)之模擬結果顯示，個案 2006 年 MCS 發展個案海平面氣壓及 850 hPa 高度場均較 CNTL 實驗模擬高，但風速較弱，顯示潛熱釋放作用確實降低局部氣壓場(或高度場)，並進而增強低層噴流，以利於鋒面或 MCS 的維持及發展。然而，此一敏感度測試結果，無論在氣壓場、高度場及風速的改變量均有訊號產生；顯示個案中的潛熱釋放效應在對流發展過程當中，扮演著重要的角色。這個重要的研究結論，可回饋至未來防災應變進駐開設作業期間，做為劇烈降雨天氣系統強度變化判斷以及影響延時評估分析的重要參考之一。

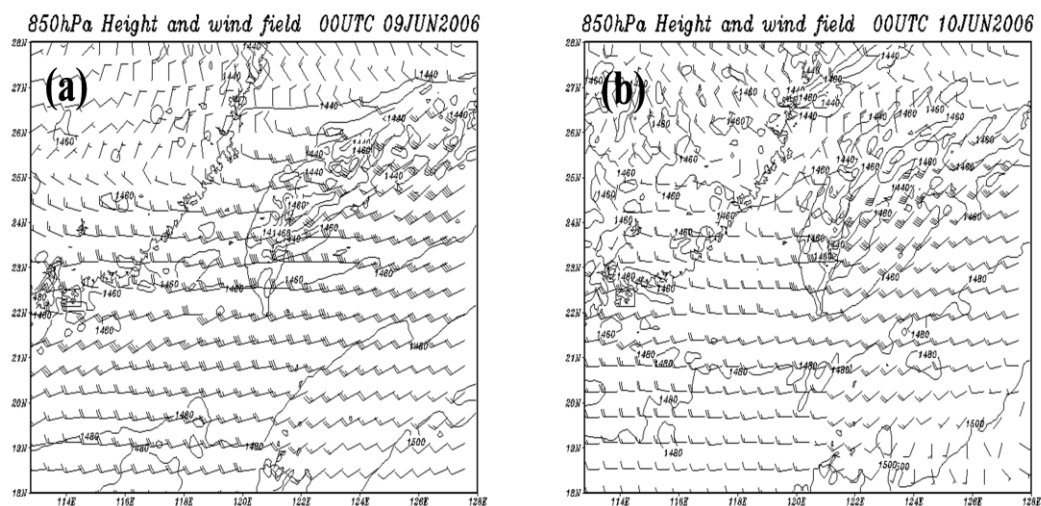


圖 2-40 模式 FDR 實驗模擬 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000UTC 之 850 hPa 的風場(全桿與半桿風標分別表示風速為 5 與 2.5 m/s) 及高度場(實線，間距為 20 gpm)分佈。

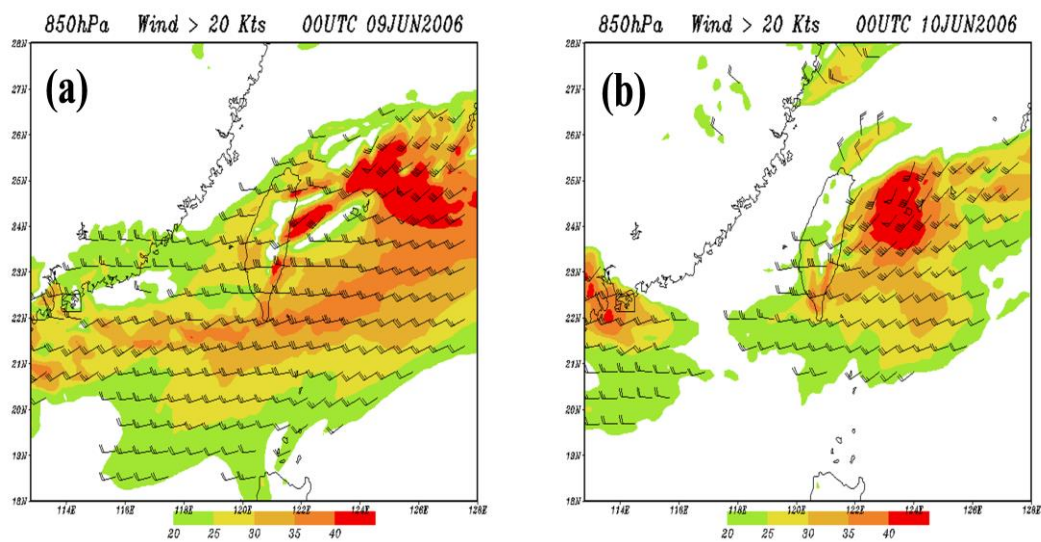


圖 2-41 模式 FDR 實驗模擬 2006 年 6 月(a)9 日及(b)10 日 0000UTC 之 850 hPa 風速大於 20 kts 區域(色階區)分佈。

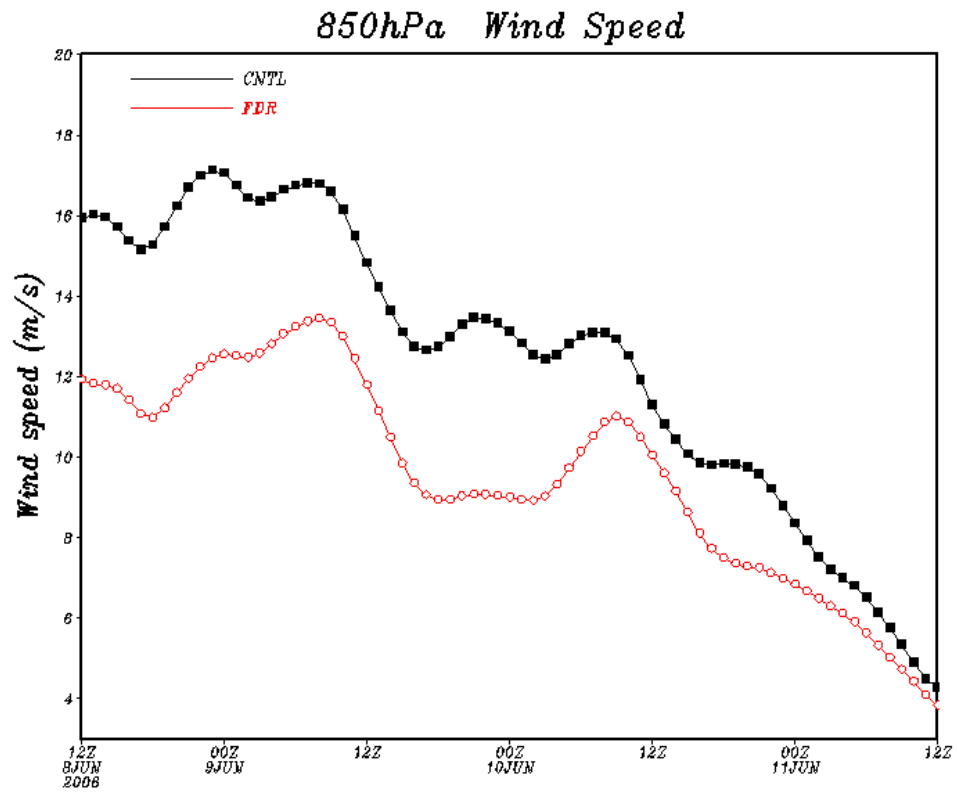


圖 2-42 控制實驗(CNTL)與無潛熱釋放實驗(FDR)模擬 2006 年 6 月 8 日 1200 UTC 至 11 日 1200 UTC 逐時，位於台灣上游區域平均(東經 114-120 度;北緯 19-25 度)之 850 hPa 風速($m s^{-1}$)時間序列(黑色線為 CNTL、紅色線為 FDR 模擬結果)。

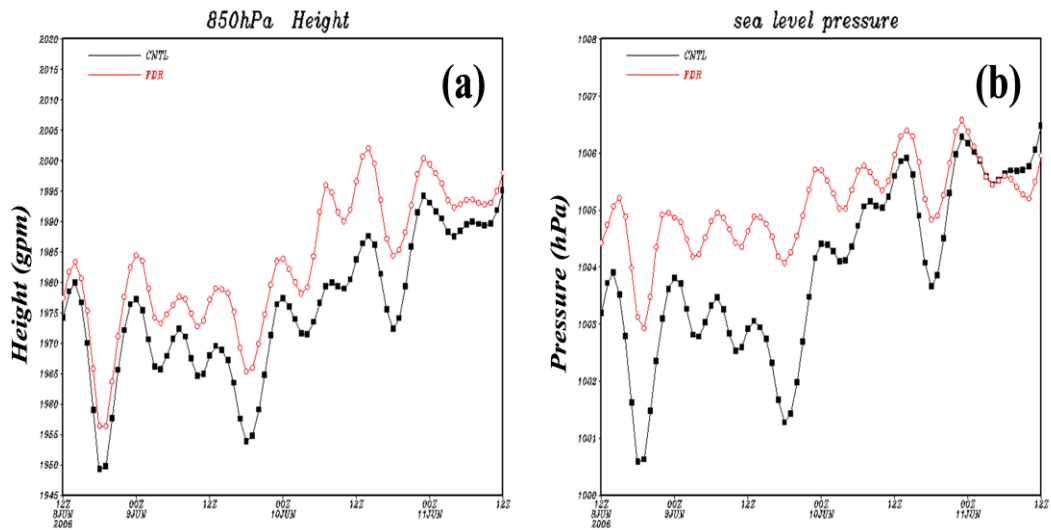


圖 2-43 控制實驗(CNTL)與無潛熱釋放實驗(FDR)模擬 2006 年 6 月 8 日 1200 UTC 至 11 日 1200 UTC 逐時，位於台灣上游區域平均(東經 114-120 度；北緯 19-25 度)(a)850 hPa 高度場(gpm)及(b)海平面氣壓場(hPa)之時間序列(黑色線為 CNTL、紅色線為 FDR 模擬結果)。

表 2-1 2006 年 6 月 8 日 1200UTC 至 11 日 1200UTC 期間 NCEP 分析場、模式控制實驗(CNTL)及無潛熱釋放實驗(FDR)之海平面氣壓(hPa)、850 hPa 高度場(gpm)及 850 hPa 風速(m/s)差異比較(比較區域取東經 114-120 度；北緯 19-25 度平均結果)。

資料 時間	NCEP 分析場			CNTL			FDR			FDR- CNTL		
	海平面 氣壓 (hPa)	850 hPa 高度場 (gpm)	850 hPa 風速 (ms^{-1})	海平面 氣壓 (hPa)	850 hPa 高度場 (gpm)	850 hPa 風速 (ms^{-1})	海平面 氣壓 (hPa)	850 hPa 高度場 (gpm)	850 hPa 風速 (ms^{-1})	海平面 氣壓 (hPa)	850 hPa 高度場 (gpm)	850 hPa 風速 (ms^{-1})
08 1200UTC	1002.6	1450	15.5	1002.3	1433	15.6	1003.7	1446	11.7	1.4	13	-3.9
08 1800UTC	1002.5	1448	15.7	1002.2	1430	15.9	1003.9	1445	11.6	1.7	15	-4.3
09 0000UTC	1002.4	1446	16.5	1003.2	1438	16.5	1005.1	1451	12.2	1.9	13	-4.3
09 0600UTC	1002.3	1445	17.9	1003.6	1441	16.3	1005.4	1457	12.8	1.8	16	-3.5
09 1200UTC	1002.4	1445	17.8	1003.0	1436	14.7	1004.8	1452	11.4	1.8	16	-3.3
09 1800UTC	1002.5	1445	16.3	1003.2	1437	13.5	1005.0	1451	9.6	1.8	14	-3.9
10 0000UTC	1003.2	1448	15.0	1004.4	1445	13.0	1006.3	1459	9.1	1.9	14	-3.9
10 0600UTC	1004.0	1453	13.5	1005.0	1452	12.7	1006.8	1468	9.7	1.8	16	-3.0
10 1200UTC	1004.7	1459	12.0	1004.8	1450	11.4	1006.7	1467	9.4	1.9	17	-2.0
10 1800UTC	1005.6	1467	11.3	1004.9	1450	9.7	1006.4	1463	7.8	1.5	13	-1.9
11 0000UTC	1006.1	1471	9.6	1005.7	1457	8.1	1006.8	1464	6.2	1.1	7	-1.9
11 0600UTC	1006.8	1477	8.8	1006.0	1460	6.1	1006.9	1468	5.0	0.9	8	-1.1
11 1200UTC	1007.7	1484	9.1	1006.1	1461	4.8	1007.0	1469	3.9	0.9	8	-0.9

第二節 工作執行步驟

- (1)彙整統計過去 16 年(2006-2021 年)臺灣土砂災害事件的時間、地點、肇因及災情等基礎背景資料。
- (2)對應(1)所篩選的個案，找出梅雨鋒面強降雨個案之降雨的雨型、特徵以及強度（以 2006-2021 年，共計 16 年統計分析資料中，梅雨季的大豪雨個案，進行劇烈天氣之前兆環境的比對診斷）。
- (3)根據(1)、(2)的結果，透過氣候統計、診斷分析以及平衡得分計算的研究方法，釐清梅雨鋒面降雨個案綜觀環境條件的特徵，與氣象量場的特性。
- (4)依據(3)分析的結果，運用高解析度模式 WRF 進行個案模擬與校驗，以及靈敏度測試的規畫，建置穩定可靠的梅雨鋒面強降雨綜觀環境診斷參數依據。
- (5)綜上，由(3)、(4)的結果，透過交叉驗證挑選後，提出梅雨鋒面劇烈降雨肇致土砂災害事件肇生環境前兆的關鍵指標，並具體回饋實際防災預警作業上（參考圖 2-4）。

第三章 工作執行進度與階段性成果

第一節 工作執行進度

研究計畫重要工作執行項目以及作業管制進度，主要以氣候統計、診斷分析及數值模擬等 3 大面向逐步進行。期初 1、2 月份，完成委託專業服務契約書撰寫及提交，置重點於研究目標的確定。隨後至 6 月份，如期完成基礎背景資料蒐整、環境氣候特徵分析與所選取個案之土砂災害肇生前兆的綜觀環境條件診斷研究，除對逐年梅雨季鋒面個案的降雨特性與環境特徵建立氣候概念的雛型外，也可瞭解梅雨鋒面劇烈降雨的先兆環境特性，再經由技術得分的計算，找到量化的數據支撐，並進一步釐清可能的關鍵量場因子，對於本案後續的研究操作，提供更為具體的設定指標與診斷參考。期間的 3、4 月份，依計畫期程，完成期初工作計畫書的撰寫及提交。

7、8 月份，進行高解析度的數值模式 WRF 針對研究個案完成模擬，一方面，藉此彌補在海上資料不足的困擾，提高在診斷分析上，時空解析度的精進，嘗試還原可能的實際天氣環境現況；另一方面，延續上半年診斷量場的關鍵因子追蹤探討，提供更為有利的量化判斷指標，建置穩定可靠的梅雨鋒面強降雨綜觀環境診斷參數依據。期間，也依計畫期程，完成期中報告的撰寫及提交。

研究計畫後期，也在 8、9 月份完成了模式模擬的靈敏度測試與驗證，進一步瞭解梅雨鋒面發展增強的能量來源，並釐清潛熱釋放在對流降雨天氣系統發展物理過程中所扮演的角色。10、11 月份，透過上述研究初步成果，經由交叉驗證挑選後，提出梅雨鋒面劇烈降雨肇致土砂災害事件肇生環境前兆的關鍵指標，並具體回饋實際防災預警作業上。期間，也依計畫期程，進行期末報告的撰寫及提交登錄等

作業，全案並於 11 月 30 日完成所有交付任務，研究成效顯著且具體，可直接回饋於防災減災應變作業上。

成果報告書的撰寫及提交，確依期末報告委員審查意見修正補強後，業已於 12 月中旬完成。研究執行迄今，研究作業與初步成果，如期、如質，依核定計畫內容，落實完成各項作業項目（參見表 3-1，計畫重要工作項目與進度管制表所示）。

表 3-1 計畫重要工作項目與進度管制表

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
工作項目												
委託專業服務契約書撰寫、提交												
基礎背景資料彙整與氣候特徵分析												
個案之土砂災害肇生前兆的綜觀環境條件												
進行高解析度的數值模式WRF模擬												
模式靈敏度測試驗證												
提出肇致土砂災害事件肇境前兆關鍵指標												
期初工作計畫書撰寫、提交												
期中報告撰寫、提交												
期末報告撰寫、提交												
成果報告撰寫、提交												
預訂進度累積百分比(%)	5	10	15	20	30	40	55	70	80	85	95	100

計畫交付項目管制，確依核定計畫內容，計已陸續完成上半年作業項目，【綜觀環境條件的特徵，與氣象量場的特性】，工作內容包含有災例蒐集、地形地質資料分析、衛星衛星雲圖診斷、氣象雷達回波分析、閃電落雷情資分析、平衡得分計算以及 NCEP/DOE 網格場資料劃圖診斷等；下半年作業項目，業已完成【進行高解析度氣象數值模式之個案數值模擬】，工作內容包含有 WRF 氣象數值模式進行個案數值模擬，並設計靈敏度測試，透過模擬結果與實際觀測數據的交叉比對與驗證，藉此釐清梅雨鋒面的影響過程與發展特徵等，2 大項的執行率均為 100%（參見表 3-2，計畫交付項目管制表所示）。

表 3-2 計畫交付項目管制表

重要工作項目	工 作 數 量				備 註
		全程計畫目標 111 年 1 月至 111 年 12 月	至 111 年度止 累計成 果	本 度 年 預 目 定 標	
綜觀環境條件 的特徵，與氣 象量場的特性	2 人	111 年 1 月 18 日 至 111 年 6 月 30 日	100%	100%	災例蒐集、資 地形地質、衛 料分析、雲圖 星衛星、氣象 診斷、回波分 雷達、閃電落 析、閃電資 雷情資分 析、以及 NCEP/DOE 網格場資料 劃圖診斷
進行高解析度 氣象數值模式 之個案數值模 擬	2 人	111 年 7 月 1 日 至 111 年 12 月 31 日	100%	100%	WRF 氣象數 值模式進行 個案數值模 擬，並設計 靈敏度測 試，藉此釐 清梅雨鋒面 的影響過程 與發展特徵

第二節 階段性成果

執行計畫迄今，計已達成階段性成果 5 項，分述如下：

1.彙整統計歷史梅雨鋒面所肇致土砂災害事件的基礎背景資料，瞭解坡地災害崩塌事件的時空分佈、肇因及災情影響。

從歷史坡地災害事件統計結果顯示，土砂災害肇生次數有減少趨勢，前 8 年的肇生事件數，佔總數的 73.4%，年際分布並無規律變化的特徵。最容易肇生的地區分別有新北市、宜蘭縣、南投縣、嘉義縣、高雄市及屏東縣；其中，高屏兩地合佔總數的 26.4% 最多。另一方面，最常發生的時段落在 6-10 月，暖季合佔總數的 93.0% 最多。當有土砂災害事件發生之際，對應當時的天氣系統以及環境特徵，以颱風、熱帶擾動或颱風過後所引進的西南氣流，共計 395 件，佔總數的 75.4% 最多；其次是梅雨鋒面，共計 85 件，佔總數的 16.1%。二者累加個數，就佔總數的 91.1%，顯見颱風（以及熱帶擾動或颱風過後所引進的西南氣流）及梅雨鋒面對我土砂災害事件的肇生，扮演非常關鍵的角色。

2.診斷釐清梅雨鋒面所肇致土砂災害肇生前兆之綜觀環境條件，以及氣象量場特徵，具體回饋防災應變整備預警作業。

梅雨季台灣地區所肇生的大豪雨事件中，平均梅雨季一年會有

1.09 次超大豪雨事件發生，而每次的大豪雨事件平均可維持在 1.58 天或以上。研究個案中，台灣地區有一梅雨滯留鋒面移入，鋒面結構發展完整，此滯留鋒面除提供 MCS 有利的發展條件，另位於南海地區持續生成及發展的對流雲系受到西南氣流導引，不僅將旺盛對流系統帶移至台灣地區，同時亦將暖溼空氣持續往台灣地區傳送，此為造成中南部地區豪大雨天氣主要的因素之一。而在這樣的大氣環境條件下，除受旺盛對流雲系移入台灣地區所造成的降水外，中央山脈地形舉升效應，也是激發台灣中南部地區對流降水的另一個重要因素。綜上，環境的風場、水氣場及溫度場對劇烈降雨天氣系統的發展、運動與影響，為關鍵的量場變因。

3.完成梅雨鋒面個案預報災區降雨的預兆得分評估。

在土砂災害案例發生前 6 小時、前 12 小時及前 24 小時的 TS 值（預兆得分數值），分別為 0.65、0.58 及 0.51，顯示就整體統計分析來看，TS 愈接近 1，累積降雨量門檻是具有預報技術能力。BS 值（偏差值數值）分別為 1.42、1.42 及 1.82，當 BS 大於 1，代表有過度預報情事，可以進行適度修正。顯示預報極端劇烈降雨事件時，預報人員對於天氣系統強度的掌握普遍都有高估的趨勢。POD 值（可偵測率數值）在土砂災害事件發生前 6 小時、前 12 小時及前 24 小

時均為 0.96，根據經驗，POD 愈高，代表預報技術愈好。FAR 值（誤報率數值）分別為 0.33、0.33 及 0.48，當 FAR 得分愈低，表示錯誤預報愈少。這也突顯在整個運動及發展過程中，仍存在有相當程度的不確定性。

再從土砂災害事件發生前 6-12 小時，無論是在可偵測率、誤報率或是預兆得分上，綜合整體的預報表現成效最佳，適可提供防災應變前置預警整備的重要參考資訊。

4. 進行高解析度的數值模式 WRF 模擬與校驗。

模擬結果，梅雨鋒面對流位置較實際觀測位置偏南。模擬結果動力場偏弱，但時間提早約 6 小時，熱力場則明顯偏高，但整體上變化的趨勢大致相同，顯示模擬對於系統有良好的掌握能力。整體來看，WRF 模式對於研究個案在綜觀環境的模擬與觀測結果大致相似，惟在風場模擬結果偏弱，時間提早約 6 小時，溫度場則明顯偏高。另外，在降水部份，模式對台灣地區降水分佈具有相當良好之掌握，惟降水強度明顯偏弱，且東部地區降水掌握相對較不理想。此一研究結果，可回饋在應變作業期間，做為運用中尺度數值模式的經驗值，適時做為修調補正的重要參考。

校驗部分，為比較 WRF 模式模擬結果對於與 NCEP $1^0 \times 1^0$ 再分

析觀測場資料之差異，且以風場及相當位溫代表大氣之動力場之熱力場。經由低對流層（850 hPa）高度之區域平均風速及相當位溫分析結果顯示：模式模擬的風速出現最大值模擬較 NCEP 分析值早，強度較弱，但變化趨勢一致；至於，相當位溫模擬值較實際值來得高，變動趨勢近乎相同。

5.經由交叉驗證測試後，提出梅雨鋒面劇烈降雨肇致土砂災害事件肇生環境前兆的關鍵指標，並具體回饋實際防災預警作業上，預早完成疏散警戒預警佈署，提供指揮官下達決策參用。

從進行模式靈敏度測試結果顯示，在無潛熱釋放之模擬結果顯示，個案對流發展個案海平面氣壓及 850 hPa 高度場均較控制組實驗模擬高，但風速較弱，顯示潛熱釋放作用確實降低局部氣壓場(或高度場)，並進而增強低層噴流，以利於鋒面或對流的維持及發展。然而，此一敏感度測試結果，無論在氣壓場、高度場及風速的改變量均有訊號產生；顯示個案中的潛熱釋放效應在對流發展過程當中，扮演著重要的角色。這個重要的研究結論，可回饋至未來防災應變進駐開設作業期間，做為劇烈降雨天氣系統強度變化判斷以及影響延時評估分析的重要參考之一。

從土砂災害事件發生前 6-12 小時，無論是在可偵測率、誤報率

或是預兆得分上，綜合整體的預報表現成效最佳，適可提供防災應變前置預警整備的重要參考資訊；就防災應變的資料判讀、決策擬定與決心下達而言，此階段的檢查確認，對於執行效益表現具有相當程度的參考價值。

第四章 結論與建議

年度計畫利用氣候統計、診斷分析及數值模擬等研究方法，針對可能肇致土砂災害之劇烈降雨天氣系統進行個案探討；現階段選取梅雨鋒面個案測試，後續視研究需求，再將颱風或其它肇因個案納入。

從歷史坡地災害事件統計結果顯示，土砂災害肇生次數有減少趨勢，年際分布並無規律變化的特徵。最容易肇生的地區分別有新北市、宜蘭縣、南投縣、嘉義縣、高雄市及屏東縣；其中，高屏兩地合佔總數的 26.4% 最多。最常發生的時段落在 6-10 月，暖季合佔總數的 93.0% 最多。當有土砂災害事件發生之際，對應當時的天氣系統以及環境特徵，以颱風、熱帶擾動或颱風過後所引進的西南氣流最多；其次是梅雨鋒面。2 者累加研究個數，就佔總數的 91.1%，顯見颱風（以及熱帶擾動或颱風過後所引進的西南氣流）及梅雨鋒面對我土砂災害事件的肇生，扮演非常關鍵的角色。

梅雨季台灣地區所肇生的大豪雨事件中，平均梅雨季一年會有 1.09 次超大豪雨事件發生，而每次的大豪雨事件平均可維持在 1.58 天或以上。研究個案中，滯留鋒面結構發展完整，此滯留鋒面除提供中尺度對流系統有利的發展條件，另位於南海地區持續生成及發展的對流雲系受到西南氣流導引，不僅將旺盛對流系統帶移至台灣地區，同時亦將暖溼空氣持續往台灣地區傳送，此為造成中南部地區豪大雨

天氣主要的因素之一。而在這樣的大氣環境條件下，除受旺盛對流雲系移入台灣地區所造成的降水外，中央山脈地形舉升效應，也是激發台灣中南部地區對流降水的另一個重要因素。綜上，環境的風場、水氣場及溫度場對劇烈降雨天氣系統的發展、運動與影響，為關鍵的量場變因。另一方面，透過平衡得分計算，預兆得分相當接近 1，顯示累積降雨量門檻是具有預報技術能力。偏差值明顯大於 1，代表預報極端劇烈降雨事件時，預報人員對於天氣系統強度的掌握普遍都有高估的趨勢。再從土砂災害事件發生前 6-12 小時，無論是在可偵測率、誤報率或是預兆得分上，綜合整體的預報表現成效最佳，適可提供防災應變前置預警整備的重要參考資訊。

研究也運用高解析度的中尺度數值模式 WRF 進行個案模擬、校驗比對與靈敏度測試。模式模擬結果，梅雨鋒面對流位置較實際觀測位置偏南。模擬結果動力場偏弱，熱力場則明顯偏高，但整體上變化的趨勢大致相同，顯示模擬對於系統有良好的掌握能力。整體來看，中尺度數值模式對於研究個案在綜觀環境的模擬與觀測結果大致相似，惟在風場模擬結果偏弱，時間提早約 6 小時，溫度場則明顯偏高。另外，在降水部份，模式對台灣地區降水分佈具有相當良好之掌握，惟降水強度明顯偏弱，且東部地區降水掌握相對較不理想。校驗部分，為比較 WRF 模式模擬結果對於與 NCEP $1^0 \times 1^0$ 再分析觀測場資料

之差異，且以風場及相當位溫代表大氣之動力場之熱力場。經由低對流層高度之區域平均風速及相當位溫分析結果顯示：模式模擬的風速出現最大值模擬較實際觀測分析值早，強度較弱，但變化趨勢一致；至於，相當位溫模擬值較實際值來得高，變動趨勢近乎相同。

研究計畫從進行模式靈敏度測試結果顯示，在無潛熱釋放之模擬結果顯示，個案對流發展個案海平面氣壓及 850 hPa 高度場均較控制組實驗模擬高，但風速較弱，顯示潛熱釋放作用確實降低局部氣壓場(或高度場)，並進而增強低層噴流，以利於鋒面或對流的維持及發展。然而，此一敏感度測試結果，無論在氣壓場、高度場及風速的改變量均有顯著訊號產生；顯示個案中的潛熱釋放效應在整個對流發展過程當中，扮演著重要的角色。這個重要的研究結論，可回饋至未來防災應變進駐開設作業期間，做為劇烈降雨天氣系統強度變化判斷以及影響延時評估分析的重要參考之一。

在土砂災害事件發生前 6-12 小時，無論是在可偵測率、誤報率或是預兆得分上，綜合整體的預報表現成效最佳，適可提供防災應變前置預警整備的重要參考資訊；就防災應變的資料判讀、決策擬定與決心下達而言，此階段的檢查確認，對於執行效益表現具有相當程度的參考價值。

研究過程中也發現，肇致土砂災害的劇烈降雨個案特徵，不只是

降雨量大，且持續時間夠長，水氣供輸相當豐沛，對於山區帶來顯著的累積降雨（林，2022）。洪等（2006）也針對2004年梅雨季個案，進行數值模式不同物理參數法組合的敏感度測試，藉此評估模式在東亞地區的預報能力，結果發現選擇不同邊界層參數法對模式預報誤差影響最顯著，不僅影響大氣邊界層內的熱量傳送，同時也和水氣垂直傳送過程有密切的關係。顯見，水氣的多寡以及輻合效應，在其間所扮演的關鍵角色。未來，將可再針對環境水氣通量的診斷以及水氣傳輸的計算，進行更為深入的量化分析，藉此釐清劇烈對流降雨行為的可能延時、過程與影響，將有助於防災預警整備作業的精進落實。

參考文獻

- Back, L. E. and C. S. Bretherton, 2009: On the Relationship between SST gradients, boundary layer winds, and convergence over the tropical oceans, *J. Climate*, **22**, 4182-4196.
- Brommer, D. M., R. C. Balling, and R. S. Cervený, 2003: Local and regional discriminators of mesoscale convective vortex development in Arizona. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1939-1943.
- Chang M.J., Chang H.K., Chen Y.C., Lin G.F., Chen P.A., Lai J.S., Tan Y.C., 2018 : A support vector machine forecasting model for typhoon flood inundation mapping and early flood warning systems. *Water* ,**10(12)**,1734.
- Chen, C. S., Y. L. Chen, C. L. Liu, P. L. Lin, and W. C. Chen, 2007: Statistics of heavy rainfall occurrences in Taiwan. *Wea. Forecasting*, **22**, 981-1002.
- Chen, G. T.-J., C.-C. Wang and L. F. Lin, 2006: A diagnostic study of a retreating Mei-Yu front and the accompanying low-level jet formation and intensification. *Mon. Wea. Rev.*, **134** ,874-896.
- Chen, G. T.-J., and H. C. Chou, 2006: A summertime severe weather event occurred in the Taipei Basin. *TAO*, **17**, 3-22.
- Chen, G. T.-J., C.-C. Wang and A. H. Wang, 2007: A case study of subtropical frontogenesis during a blocking event. *Mon. Wea. Rev.*, **135** ,2588-2609.
- Chen, G. T.-J., C.-C. Wang and S.-W. Chang, 2008: A diagnostic case

study of Mei-Yu frontogenesis and development of wavelike frontal disturbances in the subtropical environment. *Mon. Wea. Rev.*, **136**,41-61.

Chen, Y. L., and S. F. Tseng, 2000: Comments on ‘‘The Intensification of the Low-Level Jet during the Development of Mesoscale Convective Systems on a Mei-Yu Front’’. *Mon. Wea. Rev.*, **128**,495-506.

Ding ,Y,-H., and Liu Y. J., 2001: Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during the SCSMEX field experiment in 1998. *J.Meteor.Soc.Japan*,**79**,255-276.

Hong, J.-S., 2003: Evaluation of the high-resolution model forecasts over the Taiwan Area during GIMEX. *Wea. Forecasting*,**18**, 836-846.

Huang C.C., Fang H.T., Ho H.C., Jhong B.C.,2019 : Interdisciplinary application of numerical and machine-learning-based models to predict half-hourly suspended sediment concentrations during typhoons. *J Hydrol* , **573**,661-675

Jankov, I., and W. A. Gallus Jr., 2005: The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall. *Weather and Forecasting*,**20**,1048-1060.

Kim, H. W., and D. K. Lee, 2006: An observational study of mesoscale convective systems with heavy rainfall over the Korean Peninsula. *Weather and Forecasting*, **21**,125-148.

Lau, N.-C., and J.-P. Jeffrey, 2009: Simulation of synoptic- and sub synoptic-scale phenomena associated with the East Asian summer monsoon using a high resolution GCM. *Mon. Wea.Rev.*,**137**,137-160.

- Lee, C. S., L. R. Hwang, H. S. Shen, and S. T. Wang, 2006: A Climatology Model for Forecasting Typhoon Rainfall in Taiwan. *Natural Hazards*, **37**, 87-105.
- Punkka, A. J., and M. Bister, 2005: Occurrence of summertime convective precipitation and mesoscale convective systems in Finland during 2000-2001. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 362-373.
- Qian, J. H., W. K. Tao, and K. M. Lau, 2004: Mechanisms for torrential rain associated with the Mei-Yu development during SCSMEX 1998. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 3-27.
- Shankar, D., S. R. Shetye, and P. V. Joseph., 2007: Link between convection and meridional gradient of sea surface temperature in the Bay of Bengal. *Journal of Earth System Science.*, **116**, 385–406.
- Wang, J. J., 2004: Evolution and structure of the mesoscale convection and its environment: A case study during the early onset of the southeast Asian summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1104-1120.
- Wilks, Daniel S., 2011 : Statistical methods in the atmospheric sciences. *Elsevier Inc.*, **8**.
- 李鎮洋、賴文基、陳振宇、黃效禹、郭力行，2011：莫拉克颱風複合型災害發生歷程的時空重建—以小林村深層崩塌為例，中華水土保持學報，42-4，313-324。
- 林冠瑋、顏心儀、郭賢立，2015：豪雨觸發之大規模山崩的降雨條件分析，工程環境會刊，35，1-16。
- 林冠瑋、洪瀨，2019：大規模崩塌之促崩降雨分析，地工技術，161，29-36。

- 林得恩，2022：劇烈降雨系統對高山陣地之風險評估，*氣象預報與分析*，**250**，1-15。
- 周仲島、楊黎明、林得恩、魏志憲，2000：1999 年梅雨季豪雨實驗研究—伴隨梅雨鋒面中尺度對流系統之個案初步分析。第二屆國際海洋大氣會議論文彙編，中央氣象局，217-222。
- 洪景山、林得恩、簡芳菁、劉素屏、周仲島、林沛練、張文錦、繆璿如、陳致穎、雷銘中，2006：WRF 模式之敏感度測試，第一部分：探空測站上的校驗。*大氣科學*，34,241-260。
- 蔡元融、賴文基、許登傑、謝正倫、黃效禹，2016：潛在大規模崩塌區影響範圍劃設，*中華防災學刊*，8-2，159-172。
- 謝信良，1996：嘉南地區定量降水預報整合計畫—總計畫(二)。國科會防災研究報告 NSC85-2621-P-052-002，161 頁。

期初報告委員提問意見及答覆：

一、本研究透過個案研究探討梅雨鋒面致災的環境氣象參數特性，很有價值：

(一)本研究的發展對防災可以發揮貢獻。

(二)研究以 16 年的期間做為個案樣本，是否可增加？P2-1 又提到 2003 年以前，P2-5 則為對過去 35 年，應一致。

(三)P2-7 似乎說明只進行 2006 年的梅雨分析。

答：謝謝委員肯定。

(一)研究主要目標，就是期待能將成果直接回饋於防災應變的實務操作面上，透過更多個案的累積與診斷澄清，進行滾動式修正與補強，提昇在防災、減災及消災的最大效益。

(二)謝謝委員提問。本研究彙整統計過去 16 年(2006-2021 年)臺灣土砂災害事件的時間、地點、肇因及災情等基礎背景資料，做為本研究的個案樣本。其中，土砂災害事件選取，是以水保局官網公告標定之重大災害事件為準。為期所選取土砂災害事件能夠與劇烈降雨事件進行有效比對連結，再修正透過過去 16 年（2006-2021 年）梅雨季的大豪雨個案選取，進行劇烈天氣之前兆環境的比對診斷，嘗試釐清劇烈降雨個案可能肇致強降雨之關鍵氣象參數的量化特徵與變化脈動。

(三)本研究主要是以個案診斷與模擬做為探討主軸。從過去 16 年梅雨季個案中，選取導致台灣局部地區降雨分佈範圍最廣、降雨量最豐，且降雨延時最久的超大豪雨個案，2006 年 6 月 8 至 11 日間伴隨梅雨鋒面的組織性中尺度對流系統（Mesoscale convective system, MCS）個案進行診斷分析與數值模擬。

二、(一)本研究將探討梅雨鋒面降雨和坡地災害之個案研究，將分析過去 16 年梅雨季之雨量特性，但是沒有說明過去 16 年梅雨季對應之坡地災害案例，因此建議明確說明梅雨特性和坡地災害之關連性。

(二)建議本研究不只在梅雨特性的分析與模擬，而是要著重於和坡地災害的關連與未來推估坡地災害之災情可能發生地點及時間。

答：(一)謝謝委員提醒，已就氣候統計分析，進行梅雨鋒面降雨與坡地災害之關聯補充說明。在這 527 個坡地災害的案例中，因梅雨鋒面劇烈降雨而肇致的有 81 個，佔坡地災害總事件的 15.4%；而對應梅雨季台灣地區所肇生的大豪雨事件中，平均梅雨季一年會有 1.09 次超大豪雨事件發生，而每次的大豪雨事件平均可維持在 1.58 天或以上。

(二)本研究計畫的主要目標，期能透過氣候統計、診斷分析以及數值模擬等手段，對歷史土砂災害事件進行個案評估校驗，瞭解梅雨鋒面產生劇烈降雨事件的氣候特徵與環境條件，釐清當時環境的關鍵氣象參數表現，延長土砂災害可能肇生的事先預警整備時間，進而推估坡地災害之災情可能發生地點及時間。

三、未來是否有可能由哪些徵兆推估坡地崩塌災情，以利超前佈署。

答：感謝委員提醒。根據研究計畫初步診斷結果顯示，就大氣環境氣象參數的先兆特徵來看，可概分為動力機制，如：地面鋒面位置、850hPa 風切線位置、850hPa 低層噴流位置及大小、700Pa 短波槽位置、500hPa 渦度線位置及大小以及 200hPa 高層噴流位置及大小等；以及熱力機制，如：850hPa θ_e 主軸位置及指向、850hPa 水

氣通量大小以及 700hPa 的相對濕度大小等，透過掌握環境量場的變化強度，與劇烈降雨的行為趨勢，來進行可能坡地崩塌災情評估預測，俾利超前佈署。

- 四、(一) 請說明彙整統計年限定在 2006~2021 年期間，而不是更久的區間，如蒐集資料 16 年。
- (二) 簡報中有提到羅列 10 個因子，每個因子各有評分，另整合後利用何種模式演算，建議補充說明。
- (三) 有關梅雨鋒面是以中尺度狀態認定，或以每年 5、6 月為研究區間，請定義說明。

答：(一) 謝謝委員提問。本研究彙整統計過去 16 年(2006-2021 年)臺灣土砂災害事件的時間、地點、肇因及災情等基礎背景資料，做為本研究的個案樣本。其中，土砂災害事件選取，是以水保局官網公告標定之重大災害事件為準。為期所選取土砂災害事件能夠與劇烈降雨事件進行有效比對連結，再透過過去 16 年（2006-2021 年）梅雨季的大豪雨個案選取，進行劇烈天氣之前兆環境的比對診斷，嘗試釐清劇烈降雨個案可能肇致強降雨之關鍵氣象參數的量化特徵與變化脈動。

- (二) 就梅雨鋒面之大氣環境氣象參數的先兆特徵來看，可概分為動力機制，如：地面鋒面位置、850hPa 風切線位置、850hPa 低層噴流位置及大小、700Pa 短波槽位置、500hPa 渦度線位置及大小以及 200hPa 高層噴流位置及大小等；以及熱力機制，如：850hPa θ_e 主軸位置及指向、850hPa 水氣通量大小以及 700hPa 的相對濕度大小等，初步校驗成績得分，以 850hPa 低層噴流位置及大小、850hPa θ_e 主軸位置及指向、850hPa

水氣通量大小以及 700hPa 的相對濕度大小的權重最高，也就是回應到水氣場與風場的關鍵角色。另，預劃於下半年度的 2 階段將進行經由高解析度氣象數值模式 WRF 進行個案模式模擬，透過靈敏度的設計與運算，嘗試釐清梅雨鋒面前兆環境的關鍵變化，並有效回饋至防災預警的實際整備作業上。

- (三) 廣義的梅雨鋒面會以每年的 5、6 月份對臺灣地區影響的鋒面為準。但由實際監測驗證的數據則又顯示，每年 5、6 月的梅雨鋒面肇致的劇烈降雨現象，多發生在 5 月下旬至 6 月中旬之間，而致災型的降雨則多來自伴隨在梅雨鋒面上組織性的中尺度對流系統 (MCS)。所以，就防災作業的角度來看，守視梅雨鋒面的運動發展以及影響強度，需要跨尺度的時空整合研判（綜觀尺度及中尺度），俾利有效掌握系統的變化脈動，即時回饋於實際應變作業運用。

五、(一) 本案使用色調強化之衛星雲圖依不同時間點，採用了 4 種不同的產品，其產品之解析度、資料精度是否相同？如不同，如何標準化？

- (二) 計畫交付項目管制表部分，建議採甘特圖方式呈現，比較容易看出各功項在時間上的執行順序。另外，重要工作項目應可再細緻一點，如環境條件是指災例蒐集、地形地質資料分析、氣象量場可能需分析衛星雲圖、NCEP/DOE 網格場分析等。

- (三) 梅雨關鍵指標除致災程度評估外，建議亦可強化指標對致災可能區位評估

答：(一) 謝謝委員提問。因受限氣象衛星運轉生命年限，研究計劃統

計分析期間，前後特規劃選取 4 種不同類型的遙測衛星產品，克服資料短缺不足，影響整體評估判斷。主要目的在於進行監測梅雨鋒面的定位、移動與強度，並透過雲圖中雲頂溫度及其所涵蓋的雲系面積來分析梅雨鋒面的時空分佈及發展演變過程。

(二) 計畫交付項目管制表部分，已即修正採甘特圖方式呈現。

另，重要工作項目亦同步完成強化補正。

(三) 梅雨鋒面伴隨之劇烈降雨，導致可能致災之區位評估，與環境量場變化趨勢與時空分布，息息相關。本研究計劃個案診斷，初步釐清關鍵量場的可能區間，對應降雨行為與強度變化，可做為因應梅雨鋒面可能導致致災的重要參考經驗，具體回饋到實際防災應變的作業上；個案呈現可能致災之區位，多在中南部的山區，將來可再增添更多個案母數研究，俾利建立完善的梅雨鋒面防災概念模式。

期中報告委員提問意見及答覆：

一、本案研究梅雨致災，極有意義，由氣象專家以衛星觀測對土砂災害之防災極有幫助，應確實執行。

答：謝謝委員肯定。

二、擬定之實施方法，以彙整事件之資訊來對應梅雨豪雨之記錄，應屬可行，應確實實施。

答：謝謝委員肯定，將落實執行。

三、整體分析資料只有 2006 年之 6 月 8~11 日，雖有代表性，但應比對其他年份資料與記錄才可判定結果適宜性。此部份資料若已有文獻討論應有引用文獻之標註。

答：謝謝委員提醒，研究計畫彙整統計過去 16 年(2006-2021 年)臺灣土砂災害事件的時間、地點、肇因及災情等基礎背景資料，做為本研究的個案樣本。其中，土砂災害事件選取，是以水保局官網公告標定之重大災害事件為準。為期所選取土砂災害事件能夠與劇烈降雨事件進行有效比對連結，再透過過去 16 年（2006-2021 年）梅雨季的大豪雨個案選取，進行劇烈天氣之前兆環境的比對診斷，嘗試釐清劇烈降雨個案可能肇致強降雨之關鍵氣象參數的量化特徵與變化脈動。研究主要是以個案診斷與模擬做為探討主軸。從過去 16 年梅雨季個案中，選取導致台灣局部地區降雨分佈範圍最廣、降雨量最豐，且降雨延時最久的超大豪雨個案，2006 年 6 月 8 至 11 日間伴隨梅雨鋒面的組織性中尺度對流系統（Mesoscale convective system, MCS）個案進行診斷分析與數值模擬。

四、圖 2-21 對分析結果顯示上方結果均有文獻發表，應將其分析過

程詳列，是否比對所揭示的研究期間，每年的梅雨季。

答：謝謝委員提醒，對於梅雨鋒面肇致劇烈降雨的環境量場關鍵閥值選取，主要以底層至高層，採不同的分析氣象場做為研究對象，參卓過去類案的診斷結果，找出異同變化特徵，再經綜合彙整後，完成量化的檢查表。由於均為梅雨季所發生的劇烈降雨個案，大氣環境條件變化差異不大，可提供做為計畫研究的參考背景。透過釐清梅雨鋒面前兆環境的關鍵變化，並可有效回饋至防災預警的實際整備作業上。

五、圖 2-22 應有過程結果的表列，所使用的資料及成果應如何應用，代表的意義為何？

答：謝謝委員提醒，已補強於第二章第一節的實施方法內。主要參考 Wilks (2011) 技術得分計算，為評估綜觀環境條件各檢查滿足項目對於預報災區強降雨的預兆得分(Threat Score, TS)，設定觀測雨量門檻值，且設定目標災區中有任一測站達強降雨標準，即視為滿足強降雨發生。將各項目檢查預報結果與實際觀測資料分別進行比對，利用誤差矩陣判斷各次評估之準確率，誤差矩陣可分為 4 種情境，分別為滿足，有預測/有發生(hits)、滿足，有預測/無發生(misses)，無滿足，無預測/有發生(false alarms)，無滿足，無預測/無發生(no events)。故可利用其分類結果，進一步計算可偵測率(Probability of Detection, POD)、誤報率(False Alarm Ratio, FAR)以及預兆得分(Threat Score, TS)等三種評估指標，藉以掌握可靠性較高且滿足土砂災害事件肇生的綜觀環境條件關鍵因子，可適時回饋於災區強降雨發生與否的預報決策參考。

六、P.2-25 工作執行步驟(1)，(2)兩項在期中報告中看不出執行的結

果，後續應補充。

答：謝謝委員提醒，已補強於第二章第一節的實施方法內。透過氣候統計的結果，突顯出梅雨鋒面對於可能坡地災害肇生之先兆環境診斷量場的重要性，也可做為本研究計畫個案選取的關鍵參考依據。

七、本計畫提及災例蒐集過去 16 年(2006-2021 年)土砂災害事件，未見蒐集結果及相關分析資料。

答：謝謝委員提醒，已補強於第二章第一節的實施方法內。選取土砂災害事件包含有土石流、崩塌、地滑、洪水、沖蝕。統計分析結果顯示，土砂災害肇生次數有減少趨勢，前 8 年的肇生事件數，佔總數 71.9%；土砂災害事件肇生數量以 2009 年最多（共 127 件），2020 年最少（共 3 件），年際分布並無規律變化的特徵。最容易肇生的地區分別有新北市、宜蘭縣、南投縣、嘉義縣、高雄市及屏東縣；其中，高屏兩地合佔總數的 25.3%最多。另一方面，最常發生的時段落在 6-10 月，暖季合佔總數的 95.4%最多，與原先預期相當吻合。然而，我們更關心當有土砂災害事件發生之際，當時的天氣系統以及環境特徵。結果顯示，主要可分為 5 大類型，以颱風、梅雨鋒面、非梅雨鋒面的鋒面，以及午後雷陣雨、東北季風，以及東北季風與南方低壓系統所結合的共伴環流及地震，共 5 大類型。

八、有關 P.2-22 梅雨鋒面劇烈降雨之環境量場檢查如何與災害發生之關連，宜說明。

答：謝謝委員提醒。劇烈降雨前，反應在環境量場以及系統本身的變化與趨勢，均存在有顯著的關鍵訊號。根據研究診斷量場分析，

完成臺灣地區梅雨鋒面劇烈降雨檢查表，並透過個案進行校驗分析，滾動式修正，嘗試找到關鍵的有效閾值。當滿足8項或以上的項數個案，肇致豪大雨現象機會相對提高，所對應的坡地災害肇生機率也相對會增加。

九、本計畫之工作執行方法與步驟建議以流程圖加以說明。

答：謝謝委員提醒，已完成圖 2-4 研究流程圖。

十、未來提出之關鍵指標於應變期間是透過系統自動判釋或人工操作，預警時間大概能提前多久？請說明。

答：謝謝委員提醒，研究計畫所綜整關鍵量場指標，仍需藉由人工操作並判斷，預警時間約能較之前作業模式提前6至12小時完成；研究成果可直接回饋於實際應變進駐守視的作業當中。

十一、建議報告中第一次出現之英文簡寫，先寫全文或補充中文翻譯，以利不同領域讀者閱讀。

答：謝謝委員提醒，已修正。

期末報告委員提問意見及答覆：

一、可回饋於實際防災預警作業上。

答：謝謝委員的肯定。

研究計畫運用氣候統計、診斷分析，以及數模擬等不同手段，進行梅雨鋒面肇致坡地災害之個案研究。所得初步研究成果，無論是在可偵測率、誤報率或是預兆得分上，或是模式模擬結果與靈敏度測試的分析上，綜合整體的預報表現成效最佳，適可提供防災應變前置預警整備的重要參考資訊；就防災應變的資料判讀、決策擬定與決心下達而言，此階段的量化研析與校驗確認，對於回饋到實際防災預警作業的執行效益表現，具有相當程度的參考應用價值。

二、目前此模式是運用在梅雨上，是不是也可以運用在其他的鋒面。

答：研究計畫所建立的診斷模式，可有效運用在其它鋒面上的診斷與研判。

從綜觀環境條件的特徵，與氣象量場的特性，所進行的災例蒐集、肇因統計與分類、氣象關鍵量場的釐清、地形地質資料分析、衛星雲圖診斷、氣象雷達回波分析、閃電落雷情資分析、平衡得分計算以及 NCEP/DOE 網格場資料劃圖分析等，均已完成具體診斷流程的設定，可有效複製至其它鋒面上的研析。透過高解析度氣象數值模式之個案數值模擬，選用 WRF 氣象數值模式進行個案數值模擬，並設計靈敏度測試，透過模擬結果與實際觀測數據的交叉比對與驗證，藉此釐清梅雨鋒面的影響過程與發展特徵，所進行的模式設定與參數化的調整，也可有效複製至其它鋒面上的診斷。

三、本研究是否有考慮地形因素上的考量。

答：有的。

研究計畫目標設定，期能藉由梅雨鋒面的環境特徵與降雨行為，對應可能肇致坡地災害的因果過程，進行氣候統計與個案研究。以模式模擬的設定來看，從高解析度 WRF 氣象模式的初始場資料使用 NCEP GFS 再分析的初始資料，就已經融入地形因素所造成量場差異的時空分佈特性；再從模式多重巢狀可移動網格，將 NCEP GFS 內插至網格點上，並設定地形、土地利用相關環境資料，以及模式內的地形、地貌參數選取，完成模式模擬計算以及靈敏度測試，可有效反應出地形因素對風雨分佈以及氣象量場諸元的干擾與影響程度。