

國立臺灣師範大學理學院地球科學系

碩士論文

Graduate Institute of Earth Science

College of Science

National Taiwan Normal University

Master Thesis

未來長期氣候變遷對北行侵台颱風個案之降雨影響

*A Study on the Impacts of Future Long-Term Climate Change on the
Rainfall of Northward-moving Typhoon cases in Taiwan*

陳常溢

Chang-Yi Chen

指導教授：王重傑 博士

Advisor: Chung-Chieh Wang, PH. D.

中華民國 108 年 8 月

August, 2019

致 謝

一篇論文之所以能夠完整地呈現，除了研究者本人我以外，還包含著支持研究者背後的那一群人：他們是家人、朋友、老師、學長姐、整個研究室的成員、或是默默無聞的行政單位。如果少了這群人，本篇論文將難以完成。

遇到對大氣和程式語言懵懵懂懂的我，王重傑老師仍願意細心的指導，讓我從以往課本的紙上談兵，進入到面對實際發生的現象也能夠去思考背後之物理意義。老師的耐心指導使得本論文的完成為首要關鍵，老師的貢獻位居首要。

其次，謝謝孟軒學長的指導，由於研究的主題相近，加上學長的耐心，教我不少程式計算上的技巧，因為有了學長的幫助，加快了我的研究進度。

接下來，謝謝心怡學姐的教學，願意指導如何使用模式，還有許多瑣碎問題都願意幫忙。也感謝鑫皓學長的援助，在工作站維修的時候，願意協助我們到國網上面去模擬，免去了再度延畢的擔憂。也感謝智昇學長一直以來對工作站的維護和維修，讓工作站得以保持穩定運作。

感謝口試委員陳泰然老師和曾莉珊老師的建議，使得論文更加完整。然後還要再度的感謝曾老師願意讓我旁聽 Fortran 的課程，如果沒有曾老師的課程協助，本研究將雪上加霜。

謝謝周圍的朋友，包含昭億、竣安、嘉真等人的陪伴，還有怡秀助理的幫忙，讓我能夠度過這難關。背後還有默默協助的兩位學輔中心老師：鄭宇橋老師和鍾秀櫻老師，一直陪伴著我的心靈，讓我在學中遇到的挫折，都願意傾聽並協助。

最後，要感謝的人真的真的太多了，因為有了他們的協助，才有今天的我。他們對我的協助也許旁人看不到也聽不到，甚至沒有人會來翻致謝這一頁。但是他們的幫助，對我的生命歷程來說是偉大的，且永遠不會消失。

摘要

本研究主要針對暖化情境對侵台颱風在降雨方面造成的影響為主軸。為了排除諸多不確定因素，本研究選取過去發生並有發布警報之北行颱風個案，使用雲解析風暴模式 Cloud-Resolving Storm Simulator (簡稱 CReSS)重現，並將其放置於本世紀末的氣候場探討，並加以比較進行敏感度測試，隨後本研究也使用水收支方程式來探討兩者降雨差異的原因。

未來的氣候推估方面，我們選取 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)共 38 個模式，挑選 1981-2000 年 Historical run 和未來 RCP4.5 和 RCP8.5 暖化情境的 2081-2100 年，選取這三種情境的 6 到 10 月做平均後，計算這 100 年間的差異作為氣候差異場。在個案上，我們選取了梅姬颱風(2010)、泰利颱風(2012)、康芮颱風(2013)以及鳳凰颱風(2014)。各個案的控制組實驗(現代氣候)採用格點分析資料模擬，而將上述氣候差異場疊加於相同分析資料後，即為未來暖化情境的敏感度實驗。

結果顯示，各個案大同小異：梅姬颱風在距中心 500 km 半徑內，RCP4.5 情境下的總降雨量增加約 20%，RCP8.5 情境下增加約 9%；泰利颱風在 400 km 半徑內，RCP4.5 情境下總雨量增加約 11%，RCP8.5 情境減少約 2%；康芮颱風在 500 km 半徑，RCP4.5 情境下降雨量增加約 57%，RCP8.5 情境下減少約 8%；最後，鳳凰颱風在 400 km 半徑內，RCP4.5 情境下降雨量增加約 11%，RCP8.5 情境下增加約 6%。所有的共通特性皆為強降水事件增加；弱降水事件減少。由於 RCP4.5 情境下雨帶較 RCP8.5 情境分佈廣泛，而 RCP8.5 情境下降雨集中在眼牆附近。在計算格點平均時，會使得降雨較集中的 RCP8.5 情境總雨量較少，但其雨量集中的程度不容小看。

在降雨增加的原因，分析颱風的次環流運動，低層內流增強；高層外流增強，導致內核上升運動增強，這也使得降雨在內核提高。

關鍵字：氣候變遷、全球暖化、台灣

Keyword：climate change, global warming, Taiwan

目 錄

致謝.....	II
摘要.....	III
目錄.....	IV
圖表目錄.....	VI
第一章 前言.....	1
1.1 文獻回顧.....	1
1.2 研究動機.....	2
1.3 論文結構.....	3
第二章 資料來源與研究方法.....	4
2.1 資料來源.....	4
2.2 研究方法.....	5
2.3 模式簡介.....	6
2.4 模式設定.....	9
第三章 未來氣候差異與個案回顧.....	12
3.1 未來氣候差異分析.....	12
3.2 個案一 (梅姬颱風).....	14
3.3 個案二 (泰利颱風).....	15
3.4 個案三 (康芮颱風).....	16
3.5 個案四 (鳳凰颱風).....	17
第四章 個案一 (梅姬颱風).....	19
4.1 控制組實驗模擬結果.....	19
4.2 疊加氣候差異場後的敏感度實驗結果.....	20
4.3 水收支分析與小結.....	22

第五章 個案二 (泰利颱風).....	25
5.1 控制組實驗模擬結果.....	25
5.2 疊加氣候差異場後的敏感度實驗結果.....	26
5.3 水收支分析與小結.....	29
第六章 個案三 (康芮颱風).....	32
6.1 控制組實驗模擬結果.....	32
6.2 疊加氣候差異場後的敏感度實驗結果.....	33
6.3 水收支分析及小結.....	35
第七章 個案四 (鳳凰颱風).....	38
7.1 控制組實驗模擬結果.....	38
7.2 疊加氣候差異場後的敏感度實驗結果.....	38
7.3 水收支分析及小結.....	41
第八章 討論.....	43
第九章 結論.....	45
參考文獻.....	46

圖表目錄

表 2.1。為本研究所選用的 CMIP5 模式的列表，其中打*代表沒有 RCP4.5 情境的資料。.....	48
表 2.2。為四個個案的模式設定。.....	50
表 4.1 為 10 月 17 日到 10 月 23 日格點平均之日累積雨量表。分別取半徑 500 公里內和 200 公里內。單位為 mm。.....	51
表 4.2 為梅姬颱風所有時間之(10 月 16 日 0600 UTC 到 10 月 24 日 0000 UTC)，FU1、FU2、FU3 之 500 公里半徑內水氣收支方程式各項，單位為 $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。...	52
表 4.3 為半徑 500 公里從海平面垂直積分至 500hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。.....	53
表 4.3 為半徑 200 公里從海平面垂直積分至 500hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。.....	53
表 5.1。為 6 月 17 日到 6 月 20 日格點平均之日累積雨量表。分別取半徑 400 公里內和 200 公里內。單位為 mm。.....	54
表 5.2。為泰利颱風所有時間之(6 月 17 日 0000 UTC 到 6 月 21 日 0000 UTC)，TA1、TA2、TA3 之 400 公里半徑內水氣收支方程式各項，單位為 $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。.....	55
表 5.3。為半徑 400 公里從海平面垂直積分至 500hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。.....	55
表 5.4。為半徑 200 公里從海平面垂直積分至 500hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。.....	56
表 6.1 為 8 月 26 日到 8 月 29 日格點平均之日累積雨量表。分別取半徑 500 公里內和 200 公里內。單位為 mm。.....	57
表 6.2。為康芮颱風之 8 月 26 日 0000 UTC 到 8 月 30 日 0000 UTC，KO1、KO2、KO3 之 500 公里半徑內水氣收支方程式各項，單位皆為 $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。.....	58
表 6.3。為半徑 500 公里從海平面垂直積分至 500hPa 的水氣密度和風場輻合。水	

氣密度單位為 kgm^{-2} ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。	59
表 6.4。為半徑 300 公里從海平面垂直積分至 500hPa 的水氣密度和風場輻合。水	
氣密度單位為 kgm^{-2} ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。	59
表 6.5。為半徑 200 公里從海平面垂直積分至 500hPa 的水氣密度和風場輻合。水	
氣密度單位為 kgm^{-2} ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。	59
表 7.1。為 9 月 18 日到 9 月 23 日格點平均之日累積雨量表。分別取半徑 400 公	
里內和 200 公里內。單位為 mm.....	60
表 7.2 為鳳凰颱風之 9 月 18 日 0000 UTC 到 9 月 24 日 0000 UTC，FU1、FU2、FU3	
之 400 公里半徑內水氣收支方程式各項，單位皆為 $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$	61
表 7.3。為半徑 400 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。	
水 氣 密 度 單 位 為 kg / m^2 ，風 場 輻 合 單 位 為 10^{-2}m^{-1} 。	61
表 7.4。為半徑 200 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。	
水氣密度單位為 kgm^{-2} ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。	61
圖 2.1 為 CReSS 的模式發展的雲微物理現象相關轉換過程示意圖。	62
圖 2.2。模擬範圍圖(a)2010 年梅姬颱風(b)2012 年泰利颱風(c)2013 年康芮颱風	
(d)2014 年鳳凰颱風。	63
圖 3.1。(a)、(d)、(g)、(j)為 1981-2000 年 6 月到 10 月的平均場。(b)、(e)、(h)、	
(k)為 2081-2100 年 6 月到 10 月的平均場減去 1981-2000 年平均場的 RCP4.5 差	
異場。(c)、(f)、(i)、(l)為同 RCP4.5 方式獲得的 RCP8.5 的差異場。其高度為 1000、	
850、700、500 hPa。曲線為重力位高度(m)，箭頭為風速 ms^{-1} 。...	64
圖 3.2。(a)、(d)、(g)、(j)為 1981-2000 年 6 月到 10 月的平均場。(b)、(e)、(h)、	
(k)為 2081-2100 年 6 月到 10 月的平均場減去 1981-2000 年平均場的 RCP4.5 差	
異場。(c)、(f)、(i)、(l)為同 RCP4.5 方式獲得的 RCP8.5 的差異場。其高度為 1000、	
850、700、500 hPa。等質線為溫度(K)，色階為比濕(gkg^{-1})。	66
圖 3.3。中央氣象局的梅姬颱風的路徑圖，時間為 UTC 制，每 6 小時一筆。不	

同顏色代表不同強度，如圖例所示。.....	68
圖 3.4 待續。中央氣象局之在 2010 年 10 月 13 到 24 日的地面天氣圖。實線為等壓線，間距為 2 hPa。.....	69
圖 3.5 待續。中央氣象局在 2010 年 10 月 14 日到 24 日之 850 hPa 的天氣圖。實線為等高線，間隔為 50gpm。.....	72
圖 3.6 中央氣象局雷達圖，為梅姬颱風靠近的台灣時間，從圖(a)10 月 22 日 1200 UTC，(b)(c)(d)(e)(f)為)10 月 23 日 0000 UTC 到 10 月 23 日 1200 UTC，每 3 小時一筆。.....	75
圖 3.7。梅姬颱風 2010 年 10 月 21 日到 23 日的台灣地區日累積降雨圖，單位為 (mm).....	76
圖 3.8。中央氣象局的泰利颱風的路徑圖，時間為 UTC 制，每 6 小時一筆。不同顏色代表不同強度，如圖例所示。.....	77
圖 3.9 待續。中央氣象局之在 2012 年 6 月 18 到 21 日的地面天氣圖。實線為等壓線，間距為 2 hPa。.....	78
圖 3.10 待續。中央氣象局在 2012 年 6 月 18 日到 21 日之 850 hPa 的天氣圖。實線為等高線，間隔為 50gpm。.....	80
圖 3.11 泰利颱風侵台時間 6 月 20 日 0600 UTC 到 2100 UTC 的中央氣象局雷達回波圖(dBZ)。.....	82
圖 3.12 為 2012 年 6 月 18 日到 20 日台灣地區日累積降雨.....	83
圖 3.13 中央氣象局的康芮颱風的路徑圖，時間為 UTC 制，每 6 小時一筆。不同顏色代表不同強度，如圖例所示。.....	84
圖 3.14 待續。中央氣象局之在 2013 年 8 月 27 到 31 日的地面天氣圖。實線為等壓線，間距為 2 hPa。.....	85
圖 3.15 待續。中央氣象局在 2013 年 8 月 27 日到 31 日之 850hPa 的天氣圖。實線為等高線，間隔為 50 gpm。.....	87
圖 3.16 待續。康芮颱風侵台時間 8 月 28 日 1200 UTC 到 29 日 2100 UTC 的中央	

氣象局雷達回波圖(dBZ)，每 3 小時 1 筆。.....	89
圖 3.17。中央氣象局之台灣地區 8 月 28 到 29 日的日累積降雨圖，單位為 (mm)。.....	91
圖 3.18。中央氣象局的鳳凰颱風的路徑圖，時間為 UTC 制，每 6 小時一筆。不同顏色代表不同強度，如圖例所示。.....	92
圖 3.19 待續。中央氣象局之在 2014 年 9 月 18 到 24 日的地面天氣圖。實線為等壓線，間距為 2 hPa。.....	93
圖 3.20，中央氣象局在 2014 年 9 月 18 日到 24 日之 850 hPa 的天氣圖。實線為等高線，間隔為 50 gpm。.....	96
圖 3.21 待續。鳳凰颱風侵台時間 9 月 21 日 0000 UTC 到 22 日 0900 UTC 的中央氣象局雷達回波圖 (dBZ)。.....	99
圖 3.22。中央氣象局之台灣地區 9 月 20 到 22 日的日累積降雨圖，單位為(mm).	101
圖 4.1，待續。2010 年 10 月 17 日到 22 日之 1200 UTC，(a)(c)(e)(g)(i)(k)為 NCEP GFS 的 1000hPa 的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、風速(色階：單位 ms^{-1})、海平面氣壓(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)以及同一個時間的 CReSS，離地表 50m 高的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、10 公尺高的風速(色階：單位 ms^{-1})，和氣壓場(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)。.....	102
圖 4.2。為 ME1 和 CWB 路徑比較圖，每 6 小時打一個點，每 24 小時標記一次。.....	104
圖 4.3 為模擬 ME1 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速 ms^{-1} 比較圖.....	105
圖 4.4 待續。(a)(c)(e)(g)(i)(k)為 NRL 衛星資料，參數為降雨強度(inches/hr)。(b)(d)(f)(h)(j)(l)為 CReSS 輸出之降雨強度。時間上為(a)：10/17 1707 UTC；(c)：10/18 1707 UTC；(e)10/20 0526 UTC；(g)：10/20 1737 UTC；(i)：10/21 1820UTC；(k)：10/22 0515 UTC。(a)(b)為相鄰的時間，以此類推。.....	106

圖 4.5。(a)(c)(e)為中央氣象局 2010 年 10 月 20 日到 22 日 24 小時累積降雨圖。 (b)(d)(f)為 ME1 模擬結果的 24 小時累積降雨圖。左右色階相同，單位皆為 mm。.....	108
圖 4.6。為梅姬颱風之觀測和模擬路徑圖。綠色為 CWB 路徑，藍色為 ME1 路徑， 橘色為 ME2 路徑，紅色為 ME3 路徑。每 6 小時一筆，模擬 24 小時標記數字。 初始時間為 10 月 16 日 0600 UTC。.....	109
圖 4.7。為模擬 ME1、ME2、ME3 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最 大風速(ms^{-1})比較圖。.....	110
圖 4.8 待續。為梅姬颱風之 10 月 17 日 1200 UTC：(a)(b)(c)，分別為 ME1、ME2、 ME3 依此順序類推；10 月 18 日 1200 UTC：(d)(e)(f)；10 月 19 日 1200 UTC： (g)(h)(i)；10 月 20 日 1200 UTC：(j)(k)(l)的 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、 雹)的混和比於垂直方向加總。單位為(gkg^{-1}).....	111
圖 4.9。為梅姬颱風生命週期(10 月 16 日 0600 UTC 到 24 日 0000 UTC，共 186 小時)之降水粒子(雨、雪、雹)之(a)ME1 混合比(b)ME2-ME1 之混合差異比(c)ME3- ME1 之混合差異比。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里).....	113
圖 4.10。為梅姬颱風在 500、400、300、200 半徑內取格點平均的逐時降雨強度 比較圖。藍色為 ME1、橘色為 ME2、紅色為 ME3。.....	114
圖 4.11 為梅姬颱風生命週期(10 月 16 日 0600 UTC 到 24 日 0000 UTC，共 186 小 時)之降雨強度，單位 mmhr^{-1} (a)ME1(b)ME2-ME1 之降雨強度差異(c)ME3-ME1 之 降雨強度差異。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里).....	116
圖 4.12 為梅姬颱風 10 月 17 日 0600 UTC 到 22 日 0000 UTC 之軸對稱圖。X 軸 為到颱風中心點的距離，Y 軸為到地表的距離，單位為公里。參數為：平均切向 風(ms^{-1} ，等值線標示，(a)間距為 2；(b)(c)間距為 0.5)、垂直分量(色階，單位為 10 ms^{-1})、環流(徑向風和垂直速度，為箭頭標示)。(a)為 TA1(b)TA2-TA1(c)TA3- TA1。.....	117
圖 4.13 為 10 月 18 日 0000 UTC 到 10 月 23 日 0000 UTC 之 5 天累積雨量圖。單	

位為 mm，4 張圖色階都相同。(a)CWB(b)ME1(c)ME2(d)ME3	118
圖 4.14。2010 年 10 月 21 日 0000 UTC 到 23 日 0000 UTC 台灣地區降雨強度樣本數和差異比。每一個格點就是一個樣本。藍色線為 ME1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 ME2-ME1 的差異比，紅色為 ME3-ME1 的差異比，坐標軸為左方。	119
圖 4.15。為取 500 公里和 200 公里內的降水格點的比較圖。每一個格點就是一個樣本。藍色線為 ME1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 ME2-ME1 的差異比，紅色為 ME3-ME1 的差異比，坐標軸為左方。	120
圖 4.16 半徑 500 公里內水氣收支各項逐時變化圖。(a)ME1(b)ME2(c)ME3。	121
圖 4.17(a)(b)分別為 ME2-ME1 和 ME3-ME1 的降雨強度差異(單位 mmhr^{-1})，(c)(d)分別為 ME2-ME1 和 ME3-ME1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 $\text{kg/m}^2\text{hr}$)。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)	122
圖 5.1 待續。2012 年 6 月 17 日到 20 日之 1200 UTC，(a)(c)(e)(g)為 NCEP GFS 的 1000 hPa 的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、風速(色階：單位 ms^{-1})、海平面氣壓(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)以及同一個時間的 CReSS，離地表 50m 高的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、10 公尺高的風速(色階：單位 ms^{-1})，和氣壓場(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)°	123
圖 5.2，為 TA1 模擬的路徑和 CWB 路徑比較圖，藍色為 TA1，綠色為 CWB 路徑。每 6 小時打點，每 24 小時標記一次。	125
圖 5.3 為模擬 TA1 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速 ms^{-1} 比較圖	126
圖 5.4，(a)6/18 1004 UTC(c) 6/18 2235 UTC(e)6/19 2216 UTC，為 NRL 衛星觀測資料，(b)(d)(f)為 TA1 模擬的資料，參數皆為降雨強度，單位為(inches/hr)。(a)(b)為相近時間，以此類推。	127
圖 5.5。(a)(c)為中央氣象局 2012 年 6 月 19 日和 20 日 24 小時累積降雨圖。(b)(d)為 TA1 模擬結果的 24 小時累積降雨圖。左右色階相同，單位皆為 mm。 ...	128

圖 5.6 為泰利颱風之觀測和模擬路徑圖。綠色為 CWB 路徑，藍色為 TA1 路徑，橘色為 TA2 路徑，紅色為 TA3 路徑。每 6 小時一筆，每 24 小時標記數字。....	129
圖 5.7。為模擬 TA1、TA2、TA3 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速 $m \cdot s^{-1}$ 比較圖。.....	130
圖 5.8 待續。為泰利颱風之 6 月 17 日 1200 UTC：(a)(b)(c)，分別為 TA1、TA2、TA3 依此順序類推；6 月 18 日 1200 UTC：(d)(e)(f)；6 月 19 日 1200 UTC：(g)(h)(i)；6 月 20 日 1200 UTC：(j)(k)(l)的 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和比於垂直方向加總。單位為(g/kg).....	131
圖 5.9。為泰利颱風生命週期(6 月 17 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC，共 96 小時)之降水粒子(雨、雪、雹)之(a)TA1 混合比(b)TA2-TA1 之混合差異比(c)TA3-TA1 之混合差異比。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里).....	133
圖 5.10 為泰利颱風在 400、300、200 半徑內取格點平均的逐時降雨強度比較圖。藍色為 TA1、橘色為 TA2、紅色為 TA3。.....	134
圖 5.11。為泰利颱風生命週期(6 月 17 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC，共 96 小時)之降雨強度，單位(mmhr ⁻¹)(a)TA1(b)TA2-TA1 之降雨強度差異(c)TA3-TA1 之降雨強度差異。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里).....	135
圖 5.12。泰利颱風 6 月 17 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC 之軸對稱圖。X 軸為到颱風中心點的距離，Y 軸為到地表的距離，單位為公里。參數為：平均切向風(ms^{-1} ，等值線標示，(a)間距為 2；(b)(c)間距為 0.5)、垂直分量(色階，單位為 $10 ms^{-1}$)、環流(徑向風和垂直速度，為箭頭標示)。(a)為 TA1(b)TA2-TA1(c)TA3-TA1。.....	136
圖 5.13。為 6 月 18 日 0000 UTC 到 6 月 21 日 0000 UTC 之 72 小時累積雨量圖。單位為 mm，4 張圖色階都相同。(a)CWB(b)TA1(c)TA2(d)TA3.....	137
圖 5.14。2012 年 6 月 19 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC 台灣地區降雨強度樣本數和差異比。.....	138
圖 5.15。為取 400 公里內的降水格點的比較圖。每一個格點就是一個樣本。藍色	

線為 TA1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 TA2-TA1 的差異比，紅色為 TA3-TA1 的差異比，坐標軸為左方。.....	139
圖 5.16 待續。半徑 400 公里內水氣收支各項逐時變化圖 (a)TA1(b)TA2(c)TA3。.....	139
圖 5.17。(a)(b)分別為 TA2-TA1 和 TA3-TA1 的降雨強度差異(單位 mmhr^{-1})，(c)(d)分別為 TA2-TA1 和 TA3-TA1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 $\text{kg/m}^2\text{hr}$)。X, Y 軸為離中心點的距離(單位：公里).....	141
圖 6.1 待續。2013 年 8 月 26 日到 29 日之 1200UTC，(a)(c)(e)(g)為 NCEP GFS 的 1000 hPa 的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、風速(色階：單位 ms^{-1})、海平面氣壓(曲線：單位為 hPa，每條間隔 2.5 hPa)以及同一個時間的 CReSS，離地表 50m 高的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、10 公尺高的風速(色階：單位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)，和氣壓場(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa).....	142
圖 6.2。康芮颱風之中央氣象局最佳路徑路徑和 CReSS 路徑圖，每六小時打一次，每 24 小時標記一次。時間為 2013 年 8 月 26 日 0000 UTC 到 8 月 30 日 0600 UTC(中央氣象局路徑僅到 20 日 1800UTC)。藍色線為 KO1；綠色線為中央氣象局最佳路徑。.....	144
圖 6.3。為模擬 KO1 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速(ms^{-1})比較圖.....	145
圖 6.4。(a)8/26 1945UTC(c)8/27 0659UTC (e) 8/28 0123UTC 為 NRL 衛星觀測資料，(b)(d)(f)為 KO1 模擬的資料，參數皆為降雨強度，單位為(inches/hr)...	146
圖 6.5。(a)(c)為中央氣象局 2013 年 8 月 28 日和 29 日 24 小時累積降雨圖。(b)(d)為 KO1 模擬結果的 24 小時累積降雨圖。左右色階相同，單位皆為 mm。...	147
圖 6.6。為康芮颱風之觀測和模擬路徑圖。綠色為 CWB 路徑，藍色為 KO1 路徑，橘色為 KO2 路徑，紅色為 KO3 路徑。每 6 小時一筆，每 24 小時標記數字。...	148
圖 6.7。為模擬 KO1、KO2、KO3 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最	

大風速(ms^{-1})比較圖。.....	149
圖 6.8 待續。為康芮颱風之 8 月 26 日 1200 UTC：(a)(b)(c)，分別為 KO1、KO2、KO3 依此順序類推；8 月 27 日 0000 UTC：(d)(e)(f)；8 月 28 日 0000 UTC：(g)(h)(i)；8 月 29 日 0000 UTC：(j)(k)(l)的 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和比於垂直方向加總。單位為(gkg^{-1}).....	150
圖 6.9。為泰利颱風生命週期(8 月 26 日 0000 UTC 到 30 日 0600 UTC，共 102 小時)之降水粒子(雨、雪、雹)之(a)TA1 混合比(b)TA2-TA1 之混合差異比(c)TA3-TA1 之混合差異比。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里).....	152
圖 6.10 待續。為康芮颱風在 500、400、300、200 半徑內取格點平均的逐時降雨強度比較圖。藍色為 KO1、橘色為 KO2、紅色為 KO3。.....	153
圖 6.11。為康芮颱風生命週期(8 月 26 日 0000 UTC 到 30 日 0600 UTC，共 102 小時)之降雨強度，單位(mmhr^{-1})。(a)KO(b)KO2-KO1 之降雨強度差異(c)KO3-KO1 之降雨強度差異。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里).....	155
圖 6.12 康芮颱風 8 月 27 日 0000 UTC 到 30 日 0600 UTC 之軸對稱圖。X 軸為到颱風中心點的距離，Y 軸為到地表的距離，單位為公里。參數為：平均切向風($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，等值線標示，(a)間距為 2；(b)(c)間距為 0.5)、垂直分量(色階，單位為 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、環流(徑向風和垂直速度，為箭頭標示)。(a)為 KO1(b)KO2-KO1(c)KO3-KO1。.....	156
圖 6.13。為 8 月 28 日 0000 UTC 到 8 月 30 日 0000 UTC 之 48 小時累積雨量圖。單位為 mm，4 張圖色階都相同。(a)CWB(b)KO1(c)KO2(d)KO3.....	157
圖 6.14。為台灣地區 28 日 0000 UTC 到 30 日 0000 UTC 之降雨強度樣本數和差異比。.....	158
圖 6.15。為康芮颱風降雨強度樣本數和 KO2、KO3 的差異比，(a)模擬第 72 小時前(b)模擬第 72 小時後。.....	159
圖 6.16。半徑 500 公里內水氣收支各項逐時變化圖。(a)KO1(b)KO2(c)KO3。...	160
圖 6.17。(a)(b)分別為 KO2-KO1 和 KO3-KO1 的降雨強度差異(單位 mmhr^{-1})，	

(c)(d)分別為 KO2-KO1 和 KO3-KO1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 $\text{kg/m}^2\text{hr}$)。.....	161
圖 7.1 待續。2014 年 9 月 18 日到 23 日之 1200 UTC，(a)(c)(e)(g)(i)(k)為 NCEP GFS 的 1000 hPa 的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、風速(色階：單位 ms^{-1})、海平面氣壓(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)以及同一個時間的 CReSS((b)(d)(f)(h)(j)(l))，離地表 50m 高的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、10 公尺高的風速(色階：單位 ms^{-1})，和氣壓場(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)...	162
圖 7.1 鳳凰颱風之中央氣象局最佳路徑路徑和 CReSS 路徑圖，每六小時打一點，每 24 小時標記一次。時間為 2014 年 9 月 18 日 0000 UTC 到 9 月 24 日 0000 UTC(中央氣象局路徑僅到 20 日 1800UTC)。藍色線為 FU1；綠色線為中央氣象局最佳路徑。.....	164
圖 7.3。為模擬 FU1 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速(ms^{-1})比較圖.....	165
圖 7.4 待續。(a)9/18 1732 UTC(c) 9/19 0332 UTC(e)9/20 0414 UTC(g)9/20 1717 UTC(i)9/22 0402 UTC 為 NRL 衛星觀測資料，(b)(d)(f)(h)(j)為 FU1 模擬的資料，參數皆為降雨強度，單位為(mmhr^{-1})。.....	166
圖 7.5。為 2014 年 9 月 20 日到 22 日之台灣地區日累積降雨和 72 小時累積降雨。(a)(c)(e)為 CWB 日累積降雨；(b)(d)(f)為 CReSS 日累積降雨。(g)為 CWB72 小時累積降雨；(h)為模式 72 小時累積降雨。.....	168
圖 7.6。為鳳凰颱風之觀測和模擬路徑圖。綠色為 CWB 路徑，藍色為 FU1 路徑，橘色為 FU2 路徑，紅色為 FU3 路徑。每 6 小時一筆，每 24 小時標記數字。...	170
圖 7.7。為模擬 FU1、FU2、FU3 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速(ms^{-1})比較圖。.....	171
圖 7.8。為鳳凰颱風之 9 月 18 日 1200 UTC：(a)(b)(c)，分別為 FU1、FU2、FU3 依此順序類推；9 月 19 日 0000 UTC：(d)(e)(f)；9 月 20 日 0000 UTC：(g)(h)(i)；9 月 21 日 0000 UTC：(j)(k)(l)的 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和	

比於垂直方向加總。單位為(gkg^{-1})。.....	172
圖 7.9。為鳳凰颱風生命週期(9 月 18 日 0000 UTC 到 24 日 0000 UTC，共 144 小時)之降水粒子(雨、雪、雹)之(a)FU1 混合比(b)FU2-FU1 之混合差異比(c)FU3-FU1 之混合差異比。X, Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)。	174
圖 7.10 待續。為鳳凰颱風在 400、300、200 半徑內取格點平均的逐時降雨強度比較圖。藍色為 FU1、橘色為 FU2、紅色為 FU3。	175
圖 7.11。為鳳凰颱風生命週期(9 月 18 日 0000 UTC 到 24 日 0000 UTC，共 102 小時)之降雨強度，單位(mmhr^{-1})。(a)FU1(b)FU2-FU1 之降雨強度差異(c)FU3-FU1 之降雨強度差異。X, Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)。	177
圖 7.12。鳳凰颱風 9 月 18 日 0000 UTC 到 24 日 0000 UTC 之軸對稱圖。X 軸為到颱風中心點的距離，Y 軸為到地表的距離，單位為公里。參數為：平均切向風(ms^{-1} ，等值線標示，(a)間距為 2；(b)(c)間距為 0.5)、垂直分量(色階，單位為 10 ms^{-1})、環流(徑向風和垂直速度，為箭頭標示)。(a)為 FU1(b)FU2-FU1(c)FU3-FU1。	178
圖 7.13。為 9 月 20 日 0000 UTC 到 9 月 22 日 0000 UTC 之 48 小時累積雨量圖。單位為 mm，4 張圖色階都相同。(a)CWB(b)FU1(c)FU2(d)FU3。	179
圖 7.14。台灣地區 9 月 20 日 0000 UTC 到 22 日 0000 UTC 之降雨強度樣本數和差異比。	180
圖 7.15 為取 400 公里、200 公里內的降水格點的比較圖。每一個格點就是一個樣本。藍色線為 FU1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 FU2-FU1 的差異比，紅色為 FU3-FU1 的差異比，坐標軸為左方。	181
圖 7.16 待續。半徑 400 公里內水氣收支各項逐時變化圖。(a)FU1(b)FU2(c)FU3.....	182
圖 7.17(a)(b)分別為 FU2-FU1 和 FU3-FU1 的降雨強度差異(單位 mmhr^{-1})，(c)(d)分別為 FU2-FU1 和 FU3-FU1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 kgm^{-2}hr)。	183

圖 8.1，為 RCP4.5(橘色)和 RCP8.5(紅色)，在垂直方向的增溫率。.....	184
圖 8.2，為 CMISS 2012 年 6 月 18 日 1200 UTC 之深層垂直風切(約 200 減 850 hPa)疊加水氣頻道雲圖。(橘色氣流線為風切方向，等值線為風切強度，單位為 knot。)。泰利颱風位於左下角。	185



第一章 前言

1.1 文獻回顧

近數十年來，越來越多人關氣候暖化的議題，擔心是否會因為暖化而使得未來有更加強烈的天氣災害生成。聯合國跨政府氣候變遷小組(Intergovernmental Panel on Climate Change；簡稱 IPCC)第五次的評估報告(IPCC AR5,2013)認為在 21 世紀末，強降水事件、強降水的機率、強度和雨量的增加，在大部分的中緯度地區和潮濕的熱帶地區很可能增加。而強熱帶氣旋的活動，在西北太平洋和北大西洋地帶多半可能增加。

在 IPCC AR5 中，以「代表濃度途徑」來定義了四組未來氣候變遷的情境，採用 2100 年和 1750 年之間的輻射強迫力差異量來當作指標。RCP2.6 在 21 世紀末為每平方公尺的輻射強迫力增加了 2.6 瓦。RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 分別為增加了 4.5、6.0 和 8.5 瓦的輻射強迫力。CMIP5 模式和地球系統模式都按照上述的定義來對於溫室氣體的排放濃度進行推測。到了 2100 年，二氧化碳濃度依照 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 分別為達到 421 ppm、538 ppm、670 ppm 和 936 ppm。

IPCC AR5 在報告中提到：和 1850-1900 年相比，地表溫度在 21 世紀末，RCP4.5 情境下多半可能超過 2 °C(高信心)，在 RCP8.5 情境下或許可能超過 4°C。在熱帶氣旋方面，全球的發生頻率可能降低或保持不變，同時最大風速和降雨率可能提高，增加幅度約 5%到 30%之間。但對於具體區域的發生率和強度估計的信心水準度較低。在路徑上，有中等信心度預估北太平洋風暴路徑將朝極區位移。

過去曾有研究使用高解析度的氣候模式(解析度為 1°)來進行模擬受溫室效應影響的颱風(Bengtsson et al.1996)，但因為解析度仍不足，而難以模擬出颱風眼和眼牆附近的細節。Knutson et al. (1998)；Knutson and Tuleya (1999) 用更高解析度的氣候模式(約 18km)，來模擬西北太平洋區域的颱風在現在的氣候情

境和 CO₂ 濃度更高的情境比對後，發現地表風速將增強約 5%-11%，靠近颱風中心的降雨增加約 28%。

Chih-Hua Tsou et al.(2016)使用 A High Resolution Atmospheric Model (HiRAM) 模式，模擬西北太平洋和中國大陸東岸的熱帶風暴，比起低解析度的氣候模式，HiRAM 有更好的掌握。該研究顯示，在現在(1979-2003)和未來(2075-2099)相比，熱帶風暴生成數量減少：在 RCP4.5 情境下約減少 20 到 35%，在 RCP8.5 情境下約減少 49%。但等級 4 以上的颱風生成數量將增加約每年 0.6 個。且離中心半徑 200 公里內的降雨率約增加 22%。

蘇等人(2017)分析 1960~2015 年的西行颱風，共 91 個西行颱風，發現在這 30 年間的颱風，發現近 30 年的颱風，無論是登入前、登入期或離陸後，平均累積雨量和平均降雨強度和遠 30 年相比都有增加的趨勢，其登入前和登入期降雨強度增加了約 15%，離陸地後平均降雨強度增加 34%。王等人(2015)效驗雲解析數值模式模擬結果，證實雲解析模式可以合理的探討氣候變遷影響颱風對於台灣降雨分佈改變之實驗。

Sachie Kanada et al. (2017)將在日本有史以來最具有破壞力的颱風 Vera (1959)，使用 4 種模式分別是 CReSS、JMANHM、MM5 和 WRF，解析度均調整為 5 公里，初始和邊界條件使用 JRA55 進行控制組模擬。再從氣候模式 Atmospheric General Circulation model，解析度為 20 km，擷取 1979-2003 和 2075-2099 兩段時間相減後的氣候差異場，疊加在初始和邊界條件上進行敏感度實驗。發現所有模式中的颱風強度皆有增強，在未來的情境下，低層增加約 3-4 g/kg 的水氣混和比，且颱風的眼牆上升運動皆增強，顯示垂直次環流皆有增強的現象。

1.2 研究動機

由於過去使用氣候模式來分析氣候變遷對未來全球熱帶氣旋運動之變化，但礙於長時間的模擬，無法提高解析度，導致無法掌握熱帶氣旋之細節。

由於我們想了更進一步的了解區域性的熱帶氣旋在氣候變遷下的特性轉變，以及降雨在氣候變遷下的數值差異。因此使用日本名古屋雲解析模式(Cloud-Resolving Storm Simulator ,簡稱 CReSS)來進行研究。過去 Wang et al. (2015)年使用 CReSS 針對 2008 年的新樂克和薔蜜颱風進行過去和現在 40 年間氣候差異值的模擬，發現現在情境和過去 40 年情境下，降水增加約 6%到 7%左右，強降雨增加約 5%至 25%。而李孟軒(2018)針對 2009 年莫拉克、2012 年蘇拉和 2015 年蘇迪勒颱風，挑選近代 1981 到 2000 年與未來 2081 到 2100 年，共兩種情境，將近代和未來情境做 20 年的氣候差異平均後，得到未來 100 年間的氣候差異場後進行模擬。得知在降水率約 1%到 7%，強降雨(大於 50mmhr^{-1})增加約 50%。顯示西行颱風在未來 100 年有強降雨事件增加；弱降雨事件減少的特性。

由於到目前為止從未有人研究過北行颱風在氣候變遷下的影響，因此本研究將依循李孟軒(2018)的研究方法，針對北行的颱風進行探討，分析北行的颱風在未來 2100 年，在強度、路徑、降水等特性的轉變進行探討。

1.3 論文結構

本研究分成九章，第一章回顧論文及研究動機，第二章介紹本研究使用的模式 Cloud-Resolving Storm Simulator (簡稱 CReSS)，和研究的方式、資料的使用、模式的設定等等。第三章介紹未來 2081-2100 年 6 到 10 月的 RCP4.5 和 RCP8.5 對比 1981 到 2000 年 6 到 10 月的氣候差異，還有個案的介紹。第四、五、六、七章分別是四個個案的模擬和降水收支的分析，第八章為討論，第九章做結論，最後為參考文獻。

第二章 資料來源和研究方法

2.1 資料來源

本研究使用以下資料：

1. CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)，共 38 個氣候模式。
資料為月平均資料。其垂直層數為 17 層(1000、925、850、700、600、500、400、300、200、150、100、70、50、30、20 和 10 hPa)。參數有重力位高度(z)、經向風(u)、緯向風(v)、垂直溫度(T)、地表溫度(Ts)和比濕(q)。
2. 美國國家環境預測中心(National Centers for Environmental Prediction；簡稱 NCEP)的 Global Forecast System (簡稱 GFS)，每六小時一筆(0000、0600、1200、1800 UTC)，為經緯網格資料。水平解析度為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，垂直方向共 17 層(1000、925、850、700、600、500、400、300、200、150、100、70、50、30、20 和 10 hPa)，參數有重力位高度(z)、經向風(u)、緯向風(v)、氣壓(p)、垂直溫度(T)和相對溼度(RH)。
3. 歐洲中期天氣預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts；簡稱 ECMWF)之全球再分析資料(ERA-interim)。使用其海溫參數(SST)每六小時一筆(0000、0600、1200、1800 UTC)，經緯網格資料，水平解析度為 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ 。
4. 2010 年 10 月 16 日至 24 日、2012 年 6 月 17 日至 21 日、2013 年 8 月 26 日至 30 日、2014 年 9 月 18 日至 24 日，中央氣象局天氣圖、雷達回波圖、累積雨量圖。
5. 2010 梅姬颱風、2012 泰利颱風、2013 康芮颱風、2014 鳳凰颱風，使用中央氣象局颱風路徑圖，氣壓、最大風速觀測資料。
6. 2010 梅姬颱風、2012 泰利颱風、2013 康芮颱風、2014 鳳凰颱風，美國海軍研究實驗室(NRL)，提供之國防氣象衛星計劃(DMSP)與熱帶觀測任務(TRMM)衛星降水資料。和日本氣象廳多功能運輸衛星(MTAST)紅外線和可

見光頻道雲圖產品。

7. 美國威斯康辛大學麥迪遜分校空間科學暨工程中心(Space Science and Enginnering Center / University of Wisconsin-Madison) 氣象衛星研究合作研究所(Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies ; CMISS)之熱帶氣旋(Tropical Cyclones) 網頁提供之衛星雲導風場資料。

2.2 研究方法

使用 CMIP5 的氣候月平均資料，分成 Historical Run、RCP4.5 Run、RCP8.5 Run。選取 38 個模式的個別 Historical Run 1981 到 2000 的 6 月到 10 月之月平均資料來平均後取得現在平均場資料。RCP4.5 Run 暖化情境和 RCP8.5 Run 暖化情境則選取 2081 到 2100 年的 6 月至 10 月之月平均資料平均後取得未來平均場資料。將未來平均場資料減去現在平均場資料後，得到未來差異場的資料。再將個別的未來差異場資料平均後，即可能到本研究所使用之氣候差異場資料。其中 RCP8.5 Run 共有 38 個模式、RCP4.5 Run 共有 35 個模式。模式列表於表 2.1。

本研究選用颱風的條件為(1)時間為 2010-2016 年 6 到 10 月份的侵台颱風(2)有發布緊報之颱風(3)路徑被中央氣象局分類為 6、9、10 類路徑(4)靠近台灣時沒有打轉現象。因此我們選擇了 2010 年的梅姬颱風、2012 年的泰利颱風、2013 年的康芮颱風和 2014 年的鳳凰颱風。

本研究首先分析東亞地區在未來 100 年間的氣候差異場，探討氣候差異的情境對於東亞地區之影響，並與前人之研究相比。之後，我們從綜觀天氣圖分析颱風與綜觀天氣氣系統之配置與影響後，選取 NCEP GFS 分析場資料配合中央氣象局觀測資料的氣壓、路徑和風速等等作比較後，給予模式選取初始和邊界條件作為參考依據。

之後，我們選用 CReSS 進行高解析的模擬，希望藉由提高時間和空間的解析度，捕捉更細微的對流系統，來重現颱風原始風貌。並且把模式輸出的資

料、TRMM 衛星資料(如中心位置和降水分布)和中央氣象局的觀測資料(例如路徑、氣壓和台灣降雨分佈)做比較，來評定模擬後的結果是否採用為控制組實驗。接著將初始和邊界條件疊加兩種氣候差異場，並維持其他模式的設定做為敏感度實驗，以預測未來暖化情境下颱風的演變。之後，把控制組實驗與敏感度實驗做氣壓、路徑、降水等比較，來了解未來兩種氣候變遷對颱風的影響。

本研究以降水為主軸，因此更進一步對水氣收支作分析。本研究使用 Trenberth and Guillemot(1995)所提出的水氣收支方程式(2.2.1)。W 為總水密度的垂直積分，如(2.2.2)。 ρ_w 為總水密度(kgm^{-3})、 $\vec{V}$ 為水平風向量(ms^{-1})、E 為蒸發率($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、P 為降水率($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)，R 為剩餘項。再將大氣中的水分成水氣、可降水粒子(包含雨滴、雪和霰)、雲粒子(雪滴及冰晶)，可以得到(2.2.3)， ρ_p 為可降水粒子密度， ρ_c 為雲粒子密度。 W_p 和 w_c 分別式是 ρ_p 與 ρ_c 的垂直積分。在(2.2.4)中，C 為系統移動速度。(2.2.5)和(2.2.6)為水氣密度和風場輻合的垂直積分，從地表垂直積分至 500 hPa。希望藉由此方程式，來探討雨量增減的原因。

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \int_0^\infty \rho_w \cdot \vec{V} dz = E - P + R \dots \dots \dots (2.2.1)$$

$$W_V = \int_0^\infty \rho_v dz \dots \dots \dots (2.2.2)$$

$$\frac{\partial W_V}{\partial t} + \frac{\partial W_P}{\partial t} + \frac{\partial w_c}{\partial t} + \nabla \int_0^\infty \rho_v \cdot V dz + \nabla \int_0^\infty \rho_p \cdot V dz + \nabla \int_0^\infty \rho_c \cdot V dz = E - P + R \dots (2.2.3)$$

$$\nabla \int_0^\infty \rho_v \cdot V dz = \int_0^\infty \rho_v (\nabla \cdot V) dz + \int_0^\infty (V - C) \cdot (\nabla \cdot \rho_v) dz \dots (2.2.4)$$

$$\text{水氣密度：PW} = \int_0^Z \rho_v dz \dots (2.2.5)$$

$$\text{風場輻合：IHC} = - \int_0^Z (\nabla \cdot V) dz \dots (2.2.6)$$

2.3 模式簡介

本研究使用日本名古屋大學地球水循環中心所研發的雲解析風暴模式

(Cloud-Resolving Storm Simulator ,簡稱 CReSS)，版本為 3.4.2。採用非靜力、可壓縮之方程式系統，垂直座標使用追隨地勢座標，變數的配置在水平網格為 Arakara-C、垂直方向網格為 Lorenz 網格。在雲為物理的過程上，本模式完全採用外顯計算，有冷雲和暖雲兩種選擇，並且沒有積雲參數化的方法。模式主要的方程式包含：靜力方程、狀態方程、運動方程、氣壓方程、位溫方程、水氣與三態混和比方程等。

(1) 靜力方程

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = -\bar{\rho}g$$

p 為氣壓， ρ 為密度， g 為重力加速度。其中 $p = \bar{p} + p'$ ， $\rho = \bar{\rho} + \rho'$ 。

(2) 狀態方程

$$\rho = \frac{p}{R_d T} \left(1 - \frac{q_v}{\varepsilon + q_v}\right) (1 + q_v + \sum q_x)$$

$R_d = 287.05(J/kgK)$ 為乾空氣的氣體常數， T 是溫度。 $\varepsilon=0.622$ ，水氣與乾空氣分子量的比值。 q_v 是水氣混合比， q_x 是各相位狀態的粒子混合比，包含雨水(q_r)、雲水(q_c)、雲冰(q_i)、雪(q_s)、軟雹(q_g)、雹(q_h)六種。

(3) 動量方程

$$\frac{\partial \bar{p}u}{\partial t} = -\bar{p} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial x} + \bar{p}(f_s u - f_c w) + Turb. u$$

$$\frac{\partial \bar{p}v}{\partial t} = -\bar{p} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial y} + f_s \bar{p}u + Turb. v$$

$$\frac{\partial \bar{p}w}{\partial t} = -\bar{p} \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p'}{\partial z} - \bar{p}Buoy. w + f_c u + Turb. w$$

f_s 、 f_c 分別為水平和垂直方向的科氏力參數， $Turb$ 和 $Buoy$ 分別代表紊流和浮力項。

(4) 氣壓擾動方程

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial p'}{\partial x} + v \frac{\partial p'}{\partial y} + w \frac{\partial p'}{\partial z} \right) + \bar{\rho} g w - \bar{\rho} c_s^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \bar{\rho} c_s^2 \left(\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt} \right)$$

c_s 為空氣中的聲速， θ 為位溫， $Q = 1 + 0.608q_v + \sum q_x$

(5) 位溫擾動方程

$$\frac{\partial \bar{p}\theta'}{\partial t} = -\bar{p} \left(u \frac{\partial \theta'}{\partial x} + v \frac{\partial \theta'}{\partial y} + w \frac{\partial \theta'}{\partial z} \right) - \bar{\rho} w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \bar{\rho} Src.\theta + Turb.\theta$$

$Src.\theta$ 為水經過狀態變化造成的位溫改變的作用項， $Turb.\theta$ 為次網格尺度之位溫紊流混合作用項

(6) 三態水混合比方程

$$\frac{\partial \bar{p}q_v}{\partial t} = -\bar{p} \left(u \frac{\partial q_v}{\partial x} + v \frac{\partial q_v}{\partial y} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) + \bar{\rho} Src.q_v + Turb.q_v$$

$$\frac{\partial \bar{p}q_x}{\partial t} = -\bar{p} \left(u \frac{\partial q_x}{\partial x} + v \frac{\partial q_x}{\partial y} + w \frac{\partial q_x}{\partial z} \right) + \bar{\rho} Src.q_x + Turb.q_x + \bar{\rho} Fall.q_x$$

$Turb.q_x$ 為水的 x 項態次網格之紊流混合作用項， $Src.q_x$ 為水在該相態的增加或減少作用項， $Fall.q_x$ 為降水項。

(7) 水的密度方程

$$\frac{\partial N_x}{\partial t} = -\bar{p} \left(u \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{N_x}{\bar{p}} \right) + v \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_x}{\bar{p}} \right) + w \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{N_x}{\bar{p}} \right) \right) + \bar{\rho} Src. \frac{N_x}{\bar{p}} + Turb. \frac{N_x}{\bar{p}} + Fall. \frac{N_x}{\bar{\rho}}$$

N_x 為冰項粒子濃度 (m^{-3})，共含有雲冰 N_x 、霰 (N_s)、雪 (N_s)。

由於模式使用了完全可壓縮系統，包含大氣中各種不同波動的解，其相速有很大的差異，讓含有音波的項使用了短時間積分法，其他則使長時間積分法，長時間積分法使用跳蛙式搭配 Asselin 的時間濾波，短時間積分則使用陽解法的 backward scheme，並且在方程式中加入發散項來抑制音波的成長。垂直方向則使用 Nicolson schemes。

CRess 不使用積雲參數化的方式，雲物理過程的參數化之方法以 Lin et al.

(1983)、Cotton et al. (1986)、Murakami (1990)、Ikawa and Saito (1991) 和

Mueakami et al. (1994) 的總體參數畫方法為基礎，模式中的雲物理過程如圖 2.1。圖中， q_c 、 q_i 、 q_r 、 q_s 、 q_g 、 q_h 分別代表雲水、雨、雲冰、雪、雹之混合比。NUA_{vi} 為昇華核化(deposition or sorption nucleation)，NUC_{ci} 為接觸核化(contact nucleation)，NUF_{ci} 為凍結核化(condensation-freezing nucleation)，NUH_{ci} 為同質核化(homogeneous nucleation)，SP 為二次水晶生成(secondary nucleation of ice crystals)，CL 為碰撞合併(collection)，VD 為水蒸氣的昇華、凝結和蒸發(vapor deposition, evaporation and sublimation)，PG 為其他相態水與霰碰撞附著而使霰成長的效應(graupel production)，AG 為聚合(aggregation)，CN 為相態轉換(conversion)，FR 為結凍(freezing)，ML 為融解(melting)，SH 為洩滴(shedding of liquid water)，SH^N 為冰晶二次核化(secondary nucleation of ice crystals)，CL^N 為與密度相關的碰撞合併(collection)，AG^N 為與密度相關的聚合(aggregation)，CN^N 為與密度相關的狀態轉換(conversion)，FR^N 為與密度相關的凍結(freezing)， a_{rs} 為雨滴和雪碰撞形成的霰的作用。

2.4 模式設定

(1) ME1(梅姬颱風)

使用 NCEP GFS $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的分析場資料為初始和邊界條件，每六小時一筆。水平格點為 1368×1368 ，水平解析度為 2.5 km。垂直層為 50 層，平均間距 500(m)。地圖投影使用藍伯特圓錐(Lambert Conformal Conic)。初始時間為 2010 年 10 月 16 日 0600 UTC，模擬 186 小時，結束時間為 2010 年 10 月 24 日 0000 UTC。微物理過程使用冷雲過程。每一小時輸出一筆資料。海溫資料使用 ERA-interim，每六小時一筆，水平解析度為 0.75° 。初始條件設定為模式的初始場。模擬範圍標示於圖 2.2(a)，詳情見表 2.2。

(2) ME2(疊加 RCP4.5 氣候差異場，未來)

同(1)，不同處為初始和邊界條件疊加 RCP4.5 氣候差異場。

(3) ME3(疊加 RCP8.5 氣候差異場，未來)

同(1)，不同處為初始和邊界條件使用 RCP8.5 氣候差異場。

(4)TA1(泰利颱風)

使用 NCEP GFS $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的分析場資料為初始和邊界條件，每六小時一筆。水平格點為 1152×1152 ，水平解析度為 2.5 km。垂直層為 50 層，平均間距 500(m)。地圖投影使用藍伯特圓錐(Lambert Conformal Conic)。初始時間為 2012 年 6 月 17 日 0000 UTC，模擬 96 小時，結束時間為 2012 年 6 月 21 日 0000 UTC。微物理過程使用冷雲過程。每一小時輸出一筆資料。海溫資料使用 ERA-interim，每六小時一筆，水平解析度為 0.75° 。初始條件設定為模式的初始場。模擬範圍標示於圖 2.2(b)，詳情見表 2.2。

(5)TA2(疊加 RCP4.5 氣候差異場，未來)

同(4)，不同處為初始和邊界條件疊加 RCP4.5 氣候差異場。

(6)TA3(疊加 RCP8.5 氣候差異場，未來)

同(4)，不同處為初始和邊界條件使用 RCP8.5 氣候差異場。

(7)KO1(康芮颱風)

使用 NCEP GFS $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的分析場資料為初始和邊界條件，每六小時一筆。水平格點為 1152×1152 ，水平解析度為 2.5 km。垂直層為 50 層，平均間距 500(m)。地圖投影使用藍伯特圓錐(Lambert Conformal Conic)。初始時間為 2013 年 8 月 26 日 0000 UTC，模擬 102 小時，結束時間為 2010 年 8 月 30 日 0600 UTC。微物理過程使用冷雲過程。每一小時輸出一筆資料。海溫資料使用 ERA-interim，每六小時一筆，水平解析度為 0.75° 。初始條件設定為模式的初始場。模擬範圍標示於圖 2.2(c)，詳情見表 2.2。

(8)KO2(疊加 RCP4.5 氣候差異場，未來)

同(7)，不同處為初始和邊界條件疊加 RCP4.5 氣候差異場。

(9)KO3(疊加 RCP8.5 氣候差異場，未來)

同(7)，不同處為初始和邊界條件使用 RCP8.5 氣候差異場。

(10)FU1(鳳凰颱風)

使用 NCEP GFS $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的分析場資料為初始和邊界條件，每六小時一筆。水平格點為 1368×1368 ，水平解析度為 2.5 km。垂直層為 50 層，平均間距 500 m。地圖投影使用藍伯特圓錐(Lambert Conformal Conic)。初始時間為 2014 年 9 月 18 日 0000 UTC，模擬 144 小時，結束時間為 2014 年 9 月 24 日 0000 UTC。微物理過程使用冷雲過程。每一小時輸出一筆資料。海溫資料使用 ERA-interim，每六小時一筆，水平解析度為 0.75° 。初始條件設定為模式的初始場。模擬範圍標示於圖 2.2(d)，詳情見表 2.2。

(11)FU2(疊加 RCP4.5 氣候差異場，未來)

同(10)，不同處為初始和邊界條件疊加 RCP4.5 氣候差異場。

(12)FU3(疊加 RCP8.5 氣候差異場，未來)

同(10)，不同處為初始和邊界條件使用 RCP8.5 氣候差異場。



第三章 未來氣候差異與個案回顧

3.1 未來氣候差異分析

(1) 重力位高度和風場差異

圖 3.1 為重力位高度與風場在 1981 到 2000 年 6 到 10 月平均場和 2081 到 2100 年 RCP4.5 和 RCP8.5 的暖化情境下的差異場。

首先，在圖 3.1 的(a)看出，在 1000 hPa 高度，西北太平洋的高壓位於 130E，為逆鐘向的環流，到了台灣 125E 以東的海面上為東風，在台灣本島正上方為東北風，在東南亞地區海域，110E 到 120E、10N 到 20N 為西南風，並在 20N 轉為東風。圖(d)在 850 hPa，台灣地區轉為東南風，圖(g)700 hPa，台灣地區有微弱的東南風，台灣地區 30N 以北全部為西南西風，圖(j)500 hPa，台灣地區正上方為一微弱東南風，台灣以南地區轉為東南風，台灣以北地區為強勁的西風。

在 RCP4.5 場景的風場差異場中，如圖(b)，1000 hPa 東亞地區為西南風，數值約為 0.5 ms^{-1} 。圖(e)，850 hPa 台灣西南方為微弱的西南西風，在東亞地區約 10N 到 20N、110E 到 120E 為西風。到了圖(h)，可以注意到風場的差異開始轉向。到了 500 hPa 如圖(k)，台灣地區正北方為東北東風，正南方為東南東風。而在重力位高度場的整體的差異，均為正值，且有越高層增加越多的趨勢。

在 RCP8.5 情境的風場差異場中，如圖(c)，在 1000 hPa，東南亞地區有強勁的西南風，約為 1 ms^{-1} 。到了 850 hPa 如圖(f)，台灣以南為西風，以北為西南風，西太平洋海域為西風風量。到了 700 hPa，圖(i)中，台灣以北為東北風；台灣以南為西風，大尺度的逆鐘向環流包為整個東亞和東南亞海域。500 hPa，圖(l)，台灣本島正上方為東北東風，以南的風場差異較弱，台灣以北的風場差異為強勁的東北風。在重力位高度的部分，比起 RCP4.5，更有越高層增加越多的趨勢。

(2) 溫度和比濕差異

在溫度的部份如圖 3.2，相對於 1981 到 2000 年的 6 到 10 月平均場，RCP4.5 和 RCP8.5 暖化情下，從 1000 hPa 到 200 hPa 台灣部近海域的溫度皆增加，隨著垂直層越高，增加的也越多。且越往高緯度溫度增加越多，顯示熱力風為東風的風量，這點在風場的差異也有看的出來：500 hPa 高度層，在 RCP4.5 情境下，如圖(k)，在台灣地區正上方為西風，在 RCP8.5 情境下，圖(j)，台灣正上方有西北西風。而越高層增溫越多，可能使得大氣更加穩定。在台灣附近海域，如圖(c)，RCP8.5 情境下增加了約 3.4 K；如圖(b)，RCP4.5 情境下增加了約 1.8 K。與 IPCC AR5 在 2013 年公布的 CMIP5 全球多模式模擬的全球平均表面溫度的結果相似。

在比濕的部分，如圖 3.2 的色階，越低層影響越大。在未來暖化情境中，海表面比濕增加相較陸地來的多。在台灣附近海域，在 1000 hPa 層 RCP8.5 情境增加的數量約為 4 gkg^{-1} ，RCP4.5 情境下增加了約 2 gkg^{-1} ，可見暖化越嚴重，水汽增加越多。因此在 2081 到 2100 年的未來暖化環境中，可以給予颱風更多的水氣，至於這些水氣是否導致颱風降水更多，是我們探討的主軸。

(3) 小結

本研究使用 CMIP5 多個模式的系集平均取得如表圖 3.1 與圖 3.2 的資訊，在台灣附近海域地區，風場上差異上，RCP4.5 情境下 850 hPa 以下為西南風，850 hPa 以上為東北風；而 RCP8.5 情境下，在 925 hPa 以下為強勁西南風，到了 850 hPa 則轉變為西風，在 700 hPa 以上轉變為東北風。可能對於北行颱風路徑產生影響。溫度和比濕上，可以給予颱風更潮濕更溫暖的環境，讓颱風夾帶更多水氣。

3.2 個案一 (梅姬颱風)

(1) 路徑

圖 3.3 為 2010 年梅姬颱風中央氣象局的路徑圖。在 10 月 13 日 0000 UTC 位於 142E、12N 時為熱帶低氣壓，到了約 1800 UTC 時轉變為輕度颱風，正式命名為梅姬颱風，是該年第 13 個颱風。梅姬颱風一路西北行，到了 15 日 0600 UTC 的時候，位於 137.5E、15N，轉變為中度颱風。在一路西北向移動到了 10 月 17 日時，位於 127.5E、19N，增強為強烈颱風，路徑轉變為西南方向。在 10 月 18 日 0600 UTC 登入菲律賓呂宋島，穿越呂宋島後減弱為中度颱風，並在 10 月 23 日 0000 UTC 時突然北轉，以東北方向移動，進入台灣海峽後，轉為西北向，最後於 10 月 23 日 0600 UTC 時減弱為熱帶氣壓。

(2) 綜觀天氣分析

由圖 3.4(a)，10 月 14 日 0000 UTC 時，梅姬颱風位於 140.5E、11.9N，為熱帶風暴，中心氣壓約 998 hPa。在圖 3.5(a)的 850 hPa 的高空天氣圖也可以看出颱風低壓的位置，其西北方有一冷池。圖 3.4(b)在 16 日 0000 UTC 時，中心氣壓以增強到 950 hPa，位於 133.0E、17.4N，近中心最大持續風達到 40 ms^{-1} 。在圖 3.5(b)，低壓南方有一暖池。在圖 3.4(c)，10 月 18 日 0000 UTC，颱風達到最大強度，中心氣壓為 895 hPa，最大持續風為 65 ms^{-1} ，位於 123.3E、17.5N。到了 10 月 20 日 0000 UTC，梅姬颱風穿越了呂宋島，強度減弱至中心氣壓 935 hPa，最大持續風達到 48 ms^{-1} 。在圖 3.5(d)，颱風低壓周圍有暖池，可將強颱風並引導颱風路徑。圖 3.4(e)，22 日 0000 UTC 颱風進入台灣海峽，位於 118.2E、21.1N，中心氣壓 940 hPa。圖 3.4(f)，24 日，颱風登入中國大陸，減弱為熱帶低氣壓，中心氣壓為 1004 hPa。

(3) 雷達回波和降雨

圖 3.6 為雷達回波圖，(a)為 10 月 22 日 1200 UTC，從強回波帶(>40dBZ)可

以看出颱風位於台灣海峽處。而台灣本島主要受到位於宜蘭外海的強回波帶影響。圖 3.6(b)(c)(d)(e)(f)也可以看到，颱風往中國大陸移動，強回波帶主要均位於台灣海峽上而非台灣本島。圖 3.7(a)，10 月 21 日的 24 小時累積降雨主要位於台灣東北角，圖 3.7(b)22 日台灣地區除了東北角以外，東部地區及東南部也出現了超過 90 mm/day 的數值。圖 3.7(c)23 日時，颱風往中國大陸移動，在台灣地區 24 小時累積降雨並不多。

3.3 個案二 (泰利颱風)

(1) 路徑

圖 3.8 為 2012 年泰利颱風路徑圖，6 月 16 日 1800 UTC 海南島附近有熱帶低氣壓生成，到了 17 日 1800 UTC 時，轉變為輕度颱風，為該年第 1 個發布緊報的颱風。泰利形成後，從 18 日開始就一直台灣海峽移動，速度約時速 15 公里。6 月 19 日 0000 UTC 開始加快移動速度，20 日 0000 UTC 進入台灣海峽，1800 UTC 時遠離台灣，最後於 21 日 0000 UTC 減弱為熱帶低氣壓。

(2) 綜觀天氣分析

圖 3.9(a)，6 月 18 日 0000 UTC 泰利颱風位於 112.5E、18.9N，中心氣壓約 992 hPa，最大持續風約 20 ms^{-1} ，台灣東方海域有一谷超颱風，中心氣壓 945 hPa。到了圖 3.9(b)，19 日 0000 UTC，泰利颱風位於台灣西南方海域，中心氣壓約 992 hPa，最大持續風仍維持 20 ms^{-1} 。從 850 hPa 高中天氣圖 3.10(b)，可以看出泰利颱風位於谷超颱風的第 3 象限，受到谷超颱風的西南氣流牽引而朝著台灣海峽移動。20 日 0000 UTC，圖 3.9(c)，谷超颱風已減弱為低氣壓，泰利颱風位於台灣海峽，中心氣壓 990 hPa。在圖 3.10(c)，泰利颱風的低壓中心位於中國沿岸。21 日，泰利颱風已減弱成熱帶低氣壓。

(3) 雷達回波和降雨

圖 3.11 為泰利颱風靠近台灣時間之達回波圖，每 3 小時一筆。圖 3.11(a)20

日 0600 UTC 時強回波帶位於台灣西南部，過了 3 小時候，強回波帶壟罩台灣山區如圖(b)。(c)(d)(e)看出台灣幾乎被回波帶壟罩著。到了圖(f)時颱風已經遠離台灣，但仍引入西南氣流，降雨持續影響台灣。

圖 3.12 為台灣地區的日累積降雨圖，颱風從台灣西南方靠近，在 19 日時已造成西南部有降雨，到了 20 日，全台皆有降雨，在圖 3.11 強回波帶的分布也可以看到，主要累積降雨位於台灣中南部山區。

3.4 個案三 (康芮颱風)

(1) 路徑

圖 3.13 為康芮颱風的路徑圖。8 月 25 日在菲律賓東方海域生成一熱帶低氣壓，一路西北移動到了 8 月 26 日 0600 UTC，約位於 126.5E、16N，轉變為輕度颱風，是為該年西北太平洋的第 15 號颱風，是發布緊報的第 4 個颱風。繼續西北行後，在 8 月 27 日減速，並且北轉。8 月 28 日靠近台灣，8 月 29 日開始遠離台灣，於 8 月 30 日 0600 UTC 消散。

(2) 綜觀天氣分析

圖 3.14 為康芮颱風綜觀天氣圖。在 8 月 27 日 0000 UTC 時，康芮位於菲律賓呂宋島東北部，約 123.8E、18.4N，中心氣壓約 995 hPa，近中心最大風速為 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，到了 28 日 0000 UTC，颱風移動至台灣東南方海域，中心氣壓 985 hPa，暴風半徑約 120 km。29 日 0000 UTC，颱風已移動至台灣以北，如圖 3.14 的(c)，中心氣壓 985 hPa，暴風半徑 120 km。圖 3.15(c)，850 hPa 高空天氣圖中，注意到低壓中心位置位於台灣海峽上，顯示明顯結構不對稱。30 日 0000 UTC，康芮颱風往東北移動至 123.5E、28.7N，中心氣壓減弱為 998 hPa，最大風速為 18 ms^{-1} 。在圖 3.15(d)，高層的低壓中心進入 850 hPa 高層槽。

(3) 雷達回波和降雨

圖 3.16 為康芮颱風侵台時期的雷達回波圖。從(a)(b)圖中可以看出，颱風強

回波帶位於颱風的南側，雲雨帶南北不對稱。從(a)到(e)，為 8 月 28 日 1200 UTC 到 29 日 0000 UTC 的時段，颱風從台灣東方海域北上，強回波帶主要影響台灣西南部地區，這點可以從圖 3.17 的 24 小時累積降雨圖的圖(a)的降雨分布反應出來。圖 3.16 的(h)到(l)，為 29 日 0000 UTC 到 2100 UTC 的雷達回波，強回波到壟罩整個台灣，尤其是西半部地區，而這也反應在圖 3.17(b)，整個台灣的西半部日累積雨量都大於 150 mm。

3.5 個案四 (鳳凰颱風)

(1) 路徑

圖 3.18 為 2014 年鳳凰颱風中央氣象局路徑圖。9 月 16 日 1800 UTC 時為一熱帶低壓，一路西行到了約 130E、13N 時，在 17 日 1800 UTC 轉變為輕度颱風，正式命名為鳳凰颱風，是該年第 16 個颱風。鳳凰颱風一路西行，到了 19 日登入菲律賓北部，並於 20 日北轉並略微減緩移動速度。9 月 21 日 0000 UTC 到達屏東附近，並沿著台灣東岸北上，於 1800 UTC 持續北上離開台灣。22 日移速又再次減緩並於 1800 UTC 登入中國的浙江省，穿過上海後於 23 日 0000 UTC 向東移動並於 24 日 0000 UTC 減弱為熱帶低氣壓，總生命週期約 7 天。

(2) 綜觀天氣分析

鳳凰颱風於 9 月 17 日 1800 UTC 時轉變為輕度颱風，在地面天氣圖中圖 3.19 (a)在 18 日 0000 UTC 時位於 128.6E、13.3N，中心氣壓為 998 hPa，近中心最大持續風為 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，在 850 hPa 的高空天氣圖，圖 3.20 (a)中也可以看出其位置。在 9 月 20 日，圖 3.1(b)，颱風位於菲律賓以北約 120.3E、19.1N，中心達到 985 hPa，最大持續風為 25 ms^{-1} ，而在台灣以北有一波鋒面。到了 21 日，位於台灣墾丁以南約 120.4E、21.7N，強度維持在 985 hPa，颱風開始北轉，使原本位於台灣以北的鋒面向北退。在圖 3.20 (c)，颱風中心相較地面南移，看得出颱風受到向西南延伸的太平洋高壓槽影響而北上。9 月 22 日，在圖 3.19 (d)颱風以沿著台灣東岸北上，開始離開台灣，位於 122.1E、27.5N，強度

略減弱至 990 hPa，最大持續風維持約 23 ms^{-1} ，原本的鋒面向北退。在圖 3.20(d) 低壓中心在台灣海峽，而高壓位於台灣東北方海域，颱風明顯受到高壓的向北牽引。到了 9 月 24 日，颱風減弱為熱帶低氣壓，中心氣壓為 1000 hPa，圖 3.20(d)，在 850 hPa 高空天氣圖中，熱帶低氣壓進入西北太平洋高壓的槽。

(3) 雷達回波和降雨

圖 3.21、圖 3.22 分別為鳳凰颱風侵台期間(9 月 21 日到 22 日)雷達回波圖和日累積雨量圖。圖 3.21(a)(b)(c)(d)，9 月 21 日 0000 UTC 到 0900 UTC 颱風位於台灣南方，從雷達回波圖的強回波帶(>40dBZ)可以看出，主要降雨位於台灣的東南側，而隨著颱風沿著台灣東岸北上，如圖 3.21(e)(f)(g)(h)，9 月 21 日 1200 UTC 到 2100 UTC，強回波帶主要位於台灣的南部和東部地區。到了圖 3.21(i)(j)，22 日的 0000 UTC 到 0300 UTC，強回波帶位於台灣東北方。最後到了圖 3.21(k)(h)，強回波帶滯留於台灣東北方，並看得出颱風離開台灣。

從日累積雨量可以看出，在圖 3.22，颱風造成的降雨主要位於 20 日的台灣東南部與 21 日的東部和東北部，這些分布對應了雷達回波的強回波帶時間和空間分布位置。

第四章 個案一 (梅姬颱風)

研究使用 CReSS 模式 3.4.2 版本，設定如表 2.2。控制組實驗代號為 ME1。

4.1 控制組實驗模擬結果

控制組模擬代號為 ME1。圖 4.1 為控制組和 NCEP GFS 0.5 度的分析場資料做比對，(a)(c)(e)(g)(i)(k)為 NCEP GFS 的 1000 hPa 的風場，(b)(d)(f)(h)(j)(l)為模式模擬的離地表 50m 高的風場。整體上比對左右兩資料可以發現，模式掌握了 NCEP GFS 的大尺度環流場，並且模擬出比 GFS 更強更接近觀測的梅姬颱風。圖 4.2 為路徑比較圖，可以看出 ME1 在 96 小時前和觀測相近，直到 96 小時候分開，在和觀測路徑上差異不超過 2 度，還算可以接受的模擬。圖 4.3 為模擬和觀測的強度和風速比較圖。整體可以看見，圖(a)模式雖未達到觀測的 895 hPa，但有掌握到 48 小時前的快速增強的趨勢，和登入菲律賓後減弱的趨勢。在風速上，模擬有達到觀測的最大風速約 66 ms^{-1} 。登入菲律賓後減弱，但離開後又持續加強到約 63 ms^{-1} 。

在雨帶上，(a)(c)(e)(g)(i)(k)為 NRL 衛星資料，參數為降雨強度(inche hr^{-1})，(b)(d)(f)(h)(j)(l)為 CReSS 輸出之降雨強度。左右圖為相同時間，以此類推。整體上，可以看出模式有掌握到梅姬颱風的中心雨帶。由於衛星資料解析度較粗，所以模式的降雨資料會細緻且數值較高。

圖 4.5 為中央氣象局和模擬的日累積降雨比較圖。(a)(c)(e)分別是 10 月 20 日、21 日和 22 日。在觀測上，梅姬颱風造成台灣東北部有較高的日累積降雨數值，而在模擬中也有模擬出來。在圖(c)(d)北部和屏東地區的累積降雨區有模擬出來，但台東地區有高估現象。在圖(e)(f)，東北角地區累積降雨的數值和觀測有落差，但東部地區的累積降雨在模擬中有出現，但略為高估。

整體上，模式有掌握到梅姬颱風的雨帶分布和累積降水，在強度和風速上有不錯的表現。

4.2 疊加氣候差異場後的敏感度實驗結果

敏感度實驗只將控制組模擬的初始和邊界條件，疊加 RCP4.5、RCP8.5 情境，其餘設定皆不改變，實驗代號分別是 ME2、ME3。

(1) 路徑、強度、風速比較

圖 4.6 為觀測和 ME1、ME2 和 ME3 的路徑圖，可以看出，控制組較觀測偏東北方，而 ME2 和 ME3 較接近觀測。在此個案可能由於颱風為強烈颱風，較不受到低層的西南風差異場影響，反倒是在模擬到 144 小時之後，受到高層的東風影響，使其路徑偏西。在圖 4.7，強度上梅姬颱風沒有太多的改變，近中心最大風速也是，都和控制組相當。

(2) 雨帶結構比較

圖 4.8，為 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和比於垂直方向加總，單位為(gkg^{-1})。圖(a)(b)(c)為同個時間，分別為 ME1、ME2 和 ME3，由圖中可以看出，ME1 降水粒子最為廣泛；ME3 最為集中。在數值上，ME3 達到最 10 gkg^{-1} 以上的部分最廣。在圖(d)(e)(f)也有類似的現象。到了(g)(h)(i)，ME2 和 ME3 颱風眼變得比 ME1 更大，眼牆的部份可降水粒子比 ME1 數值達到更高且更集中。到了(i)(j)(k)，也可以看到 ME2 和 ME3 眼牆變的比 ME1 稍微大了點，可降水粒子也較集中於中心的眼牆。

在圖 4.9，為梅姬颱風生命週期之降水粒子的(a)混和比、(b)ME2-ME1、(c)ME3-ME1。由圖(b)可以看出在 RCP4.5 情境下，ME2 的可降水粒子分布較廣泛，而在 RCP8.5 情境下，可降水粒子幾乎集中在中心外圍和眼牆的部份。

(3) 降水比較

圖 4.9 為梅姬颱風在 500、400、300、200 公里半徑內取格點平均的降雨強度逐時圖。從(a)可以看出 ME2 和 ME3 的降雨強度略高於 ME1。圖(b)，ME2 高於 ME1，注意到 ME3 甚至比 ME1 還要低，這可能代表降雨分佈中，ME3 較

ME1 和 ME2 為集中於眼牆附近。圖(c)，ME3 和 ME2 降雨強度不分上下，到了圖(d)，ME3 有部分時間略高於 ME2。代表 ME3 強降雨較集中。

表 4.1 為 10 月 17 日到 10 月 23 日格點平均之日累積雨量表，分別取半徑 500 公里內和 200 公里內，單位為 mm。注意到總平均，在 500 公里半徑下，ME2 約增加了 20% 的日累積降雨；而 ME3 則約增加了 9% 的累積降雨。在 200 公里半徑內，ME2 約增加了 25% 的累積降雨；ME3 約增加 23%，ME2 則增加約 25%。略高於 ME3。

圖 4.11 為梅姬颱風生命週期之降雨強度分佈圖。(a)ME1(b)ME2-ME1 之降雨強度差異(c)ME3-ME1 之降雨強度差異。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：km)。圖(b)，強降雨帶位於颱風中心南側 100 公里處，外圍環流有許多地區降雨強度都比 ME1 還要來的強，例如東北方約 400 公里處。而在圖(c)，強降雨帶仍位於中心的南方約 100 公里處，且數值超過 8mmhr^{-1} 的面積遠遠超過 ME2。在外圍環流上，東北方約 400 公里處的強降雨帶沒有 ME2 來的強。

圖 4.12 為梅姬颱風 10 月 17 日 0600 UTC 到 22 日 0000 UTC 之軸對稱圖，圖示細節詳見圖說。在圖(b)，中心有更強的上升運動，在低層約 2 公里高以下，內流增強，在約 200 到 300 公里處上升，約在 8 到 10 公里高外流增強，形成更強的次環流運動。而在離中心 100 到 200 公里間，上升運動增強，而 200 到 300 公里間，有更旺盛的上升運動，這和圖 4.10 的(b)還有圖 4.9 的(c)和(d)出現強降雨處呼應。回到圖 4.11(c)，低層同樣內流增強，約在 10 公里高外流增強，形成一個更強的垂直次環流。離中心 100 公里內，有更強的上升運動，這對應到圖 4.10 的(c)強降雨帶位置相符。而 200 公里到 300 公里間，有更強盛的上升運動，也可以對應到圖 4.10 的(c)中的北方的強降雨帶。

(4) 台灣地區降雨比較

圖 4.13 為台灣地區於 2010 年 10 月 18 日到 10 月 23 日的 5 天累積降雨。圖分別是(a)CWB(b)ME1(c)ME2(d)ME3。由圖可以看到，在 RCP4.5 情境下台灣東

北角的累積降雨大幅提高；在 RCP8.5 情境下，原本位於東北角地區的累積降雨移動到北海岸，但位於花東山區的累積降雨有提高。

圖 4.14 為台灣地區降雨強度樣本數和差異比圖，可以看到整體也有弱降雨事件減少；強降雨事件增多的現象。注意到 RCP8.5 情境下，相較 RCP4.5 情境在大於 50 mmhr^{-1} 差異比少許多。但是在 ME2 和 ME3 颱風的路徑差不多。可能是在疊加背景差異值的時候，RCP8.5 有較強勁的西南風，將原本的乾冷東北風和梅姬颱風帶來的暖濕西南風輻合的位置北推了，強降雨區離開的台灣北部地區，使得 ME3 在大於 50 mmhr^{-1} 差異比相較 ME2 少很多。

4.3 水收支分析和小結

(1) 半徑降雨比較

圖 4.15。為取 500 公里和 200 公里內的降水格點的比較圖。每一個格點就是一個樣本。藍色線為 ME1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 ME2-ME1 的差異比，紅色為 ME3-ME1 的差異比，坐標軸為左方。圖(a)在 RCP4.5 情境下，ME2 降雨強度在約 $7\sim 8 \text{ mmhr}^{-1}$ 就開始有明顯的增加；而 RCP8.5 情境下，約在 18 mmhr^{-1} 開始有明顯的增加。整體上有弱降水事件減少；強降水事件增加的趨勢。在圖(b)出現相同的趨勢，注意到在圖(b)中，ME3 大於 50 mmhr^{-1} 的樣本數約超過 ME1 的 80%，而 ME2 則超過約 70%。

(2) 水收支分析

表 4.2 為水氣收支方程式中的各項的數值列表，取 500 公里半徑來計算，單位為 $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。注意到總水含量時間變率、總水密度通量輻合率、蒸發率和降水率為總項，其餘為細項。注意到數值大小，以降水率為最大值，其次為總水密度通量輻合率。代表這兩項為方程式中主要影響結果的項目。在降水率中，RCP4.5 情境下的 ME2 增加約 19%；而 RCP8.5 情境下的降水率約 8%。蒸發率為地表蒸發率，是給予颱風水氣的來源之一，不過就數值來說，總水密度通量輻合率大於蒸發率。近一步細看總水密度通量輻合率，可以分解成水氣密

度輻合率、降水粒子密度輻合率、雲粒子密度輻合率、水氣密度平流率、降水粒子密度平流率和雲粒子密度平流率共 6 項。其中以水氣密度輻合率為數值最大的項目。

圖 4.16 為半徑 500 公里內水氣收支各項逐時變化圖，(a)(b)(c)分別是 ME1、ME2、ME3。注意到降水率和總水密度輻合率的增減的趨勢相當，代表這兩項相關性極高。剩餘項和總水含量時間變率也有一定的相關性，可能代表剩餘項的來源和時間變率的計算方式有關，由於模式為每小時輸出一筆，時間變率也是每小時計算一次，若能夠減少模式輸出的間隔，可能有機會讓剩餘項減少。平流項為負值，代表水氣密度平流離開颱風。

圖 4.17(a)(b)分別為 ME2-ME1 和 ME3-ME1 的降雨強度差異(單位 mmhr⁻¹)，(c)(d)分別為 ME2-ME1 和 ME3-ME1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 kgm⁻²hr⁻¹)。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)。在圖(a)中心正南方 100 公里有強降雨帶，對應到圖(c)中心的正南方也有較強的通量輻合率，水氣密度通量輻合率可以分解成水氣密度的平流率和輻合率，其中輻合率數值遠高過平流率，因此可以說降雨率和水氣密度輻合率有著高相關性。圖(b)和(d)也有一樣的結果。

為了進一步探討水氣來源的原因，水氣密度輻合率可以分成水氣密度(2.2.5)和風場輻合(2.2.6)兩大元素。表 4.3 為半徑 500 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kgm⁻²，風場輻合單位為 10⁻²m⁻¹。而表 4.4 則是為取半徑 200 公里的結果。此個案從 500 公里到 200 公里，水氣密度差異增加了約 3%；而風場輻合則為 0%(ME2)和 2%(ME3)。由於越靠眼牆降水率增加幅度越大，因此，可能由水氣密度主導。

(3) 小結

模擬了 ME1、ME2 和 ME3，3 種不同情境，比較其路徑發現，ME2 和 ME3 相較 ME1 在模擬到 144 小時之後分開偏西。在強度和風速上，沒有顯著

的差異。在雨帶差異上，ME2 相較 ME3 為廣泛。在降雨強度上，有弱降雨事件減少；強降雨事件增加的趨勢。在水氣收支方程式中，我們取半徑 500 公里來計算，ME2 降雨率增加約 19%，而 ME3 降雨率增加約 8%，ME3 降雨率比 ME2 少可能原因為 ME3 降雨較集中於眼牆和其周圍。分析降雨率來源，主要以水氣密度輻合率主導。最後我們分析了水氣密度輻合率增加的來源，主要原因可能為水氣密度增加所導致。



第五章 個案二（泰利颱風）

研究使用 CReSS 模式 3.4.2 版本，設定如表 2.2。控制組實驗代號為 TA1。

5.1 控制組實驗模擬結果

圖 5.1 為 NCEP GFS 和 CReSS 模擬的風速和氣壓分布圖，(a)(b)為同一時間，(c)(d)為同一時間，以此類推。比較(a)和(b)、(c)和(d)，模擬的颱風位置和風場的分布類似，代表模式有掌握到大環境的環流場。到了(e)(f)，是泰利颱風移動速度加快的時間，在模式裡也有反映出來。(g)和(h)，NCEP GFS 中的颱風已漸漸減弱，而模式中的颱風強度和風速仍然維持，是不太一致的地方。

圖 5.2 為 TA1 模擬的路徑和 CWB 路徑比較圖，藍色為 TA1，綠色為 CWB 路徑。注意到，在前 48 小時的模擬，初始時間點和觀測的颱風中心略有差距，接著來接在附近打轉。到了 48 小時，模擬和觀測靠近。之後又再次分開，60 小時又靠近，在模擬到 72 小時幾乎重疊。整體上模擬和觀測的颱風移動速度相近，位置偏移的距離尚可接受。

圖 5.3 為中心氣壓和近中心最大風速比較圖，在中心氣壓的部份，觀測停留在 990 hPa，為獨 6 月 19 日 1800 UTC 中心氣壓達到 985 hPa；而模式的部份，整理來說比觀測強了約 10 hPa，在 6 月 19 日 0000 UTC 時氣壓到了 972 hPa，比觀測強了約 20 hPa。整體上模式比觀測強，還在尚可接受的地步。最大風速比較的部份，觀測約 20 到 25 ms^{-1} ，在模式中相較觀測偏強，到了 25 到 35 ms^{-1} 。

圖 5.4 為 NRL 衛星資料之降雨強度分布圖和模擬的降雨強度分布圖比較。在圖(a)(b)中，為模擬的 34 小時的降雨強度分布。圖(a)半月型雨帶，以 112E、18N 為極值，而圖(b)，模式中也呈現半月型帶狀，顯示模式掌握了雨帶結構。到了 6 月 18 日 2235 UTC，圖(c)雨帶位於約 20N 以南，圖(d)模式中呈現螺旋型雨帶，並且主要位於 20N 以南，和衛星資料相符。到了圖(e)和(f)，NRL 衛星資

料降雨主要位於 120E 以西、24N 以南，並呈現東北-西南走向；圖(f)，雨帶呈現螺旋型，主要雨帶也位於 120E 以西、24N 以南，也呈現東北-西南走向，和觀測相符。圖(g)颱風靠近台灣，在台灣地區西南部造成強降雨，在模式中也有呈現出來。顯然模是對於泰利颱風的雨帶分布，有不錯的掌握。

圖 5.5 為 2012 年 6 月 19 日到 20 日的 24 小時累積降雨，單位為 mm。圖(a)和(b)為同一個時間，依序為 CWB 觀測資料和 TA1 模擬資料。從(a)中，19 日主要累積降雨在南部地區，在(b)中也有類似的結果，只是數值相較觀測略高，且台東的南部地區門檻值達到 180 mm 而觀測值僅達到 100 mm。可能是模式中的泰利颱風相較於觀測的路徑，較靠近台灣的結果。而 6 月 20 日，觀測的累積降雨，主要位於南部山區，如圖(c)。而模式主要位於整個南部，全部數值達到 400 mm 以上。超過了觀測數值。中部山區，也超過了觀測數值，可能和模式中颱風的路徑比 CWB 觀測路徑更靠台灣有關。

5.2 疊加氣候差異場後的敏感度實驗結果

敏感度實驗只將控制組模擬的初始和邊界條件，疊加 RCP4.5、RCP8.5 情境，實驗代號分別是 TA2、TA3。

(1) 路徑、強度、風速比較

圖 5.6 為泰利颱風模擬路徑圖，圖片中包含 TA2(RCP4.5 未來情境)和 TA3(RCP8.5 未來情境)。首先注意到 TA2，在模擬第 72 小時前和 TA1 的路徑差不多，移動速度也差不多到了第 78 小時以後偏北偏西，可能是受到 RCP4.5 氣候差異場中，圖 3.1(k)高層有較強的東北風分量遠大過低層西南風分量的影響。再來我們看到 TA3，模擬第 72 小時前颱風移動速度較快，且路徑偏北，可能是受到 RCP8.5 氣候差異場中，低層有強勁的西南風分量影響。到了第 90 小時以後，路徑偏東，和圖 3.1(f)在台灣以北有強勁東風分量影響。

在圖 5.7，為 TA1、TA2、TA3 模擬實驗和 CWB 觀測的中心氣壓和最大風速比較圖。注意到，TA1、TA2、TA3，在強度上差異不大，TA2 約略比 TA1 和

TA3 強一點，最大風速上，以 TA2 比其他的情境略強一點，約強 1 到 5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 雨帶結構比較

圖 5.8，為 TA1、TA2、TA3 在同時間的降水粒子(雨、雪、雹)混和比在垂直方向的加總，單位為 gkg^{-1} 。在(a)(b)(c)，依序為 TA1、TA2、TA3。可以看到，在 17 日 1200 UTC 時，TA1 的降水粒子分布最廣，TA3 分布最集中於颱風中心。在 18 日 1200 UTC 時，(d)(e)(f)，降水粒子主要分布於颱風南側，和上一個時間同樣的，在 TA1 和 TA2，降水粒子延伸到 111E 以西、18N 以南地區；而 TA3 則聚集在颱風南方地區。在(g)(h)(i)，也有一樣的現象，TA1、TA2 可降水粒子向西南方延伸到了 113E；而 TA3 則只有到 114E。顯示 RCP8.5 場景下，可降水粒子較 RCP4.5 場景集中於中心。靠近中心的混和比數值也較高。

圖 5.9，為整個颱風生命週期的 TA1、TA2-TA1 和 TA3-TA1 的可降水粒子的平均，單位為 (gkg^{-1}) 。X 軸和 Y 軸是離颱風中心點的距離，單位為公里。座標上(0,0)代表颱風中心。注意到在(b)中，降水粒子差異為正值(橘紅色)的分布極廣，颱風外圍環流夾帶的降水粒子也比(c)來的多，但是以極大值來看，(c)在約位於(25,-175)附近的位置有大於 $0.5(\text{gkg}^{-1})$ 的差異值，比起(b)的極值：約位於(0,-50)，數值約 $0.4(\text{gkg}^{-1})$ 來的大。顯示在 RCP4.5 情境中，降水粒子分部的範圍更廣；而 RCP8.5 情境中，降水粒子分部較集中於颱風中心。

(3) 降水比較

圖 5.10 為泰利颱風在各個半徑內取格點平均後的逐時降雨強度比較圖。圖(a)(b)(c)中，前 6 小時各情境的降雨快速上升，代表颱風生成，模式需要時間去掌握雨帶的結構。圖(a)，TA2 在每個時間點幾乎都比 TA1 甚至 TA3 較大。而圖(b)和(c)，TA2 仍然不輸給 TA3，代表在 RCP4.5 情境中，降雨的範圍變的廣大，導致在進行格點平均的時候，有更多的格點有降雨事件，因此獲得較大的數值。注意到模擬第 41 到第 61 小時，是颱風最強的期間，因此降雨強度達

到最高。在模擬到 81 小時之後，颱風遠離台灣且已漸漸消散，僅剩下外圍環流和西南氣流夾帶的降雨，因此在 300 公里和 200 公里半徑內，單位格點的降雨強度都迅速下降。在 200 公里，降雨強度比其他半徑都來的強，這會在後面做進一步的分析。

表 5.1 為 6 月 17 日到 6 月 20 日日累積降雨取格點平均後的數值，有半徑 400 公里和 200 公里。在 6 月 17 日，為颱風生成初期，日累積格點平均的降雨略低。注意到在 400 公里半徑內 TA2 比 TA3 有更高的累積降雨；而在 200 公里半徑內也相同。6 月 18 日，為颱風增強期，累積降雨均提高，在 TA2 更是超越 TA1 和 TA3。6 月 19 日，TA2 仍然比 TA3 還要更高的數值。6 月 20 日為颱風靠近台灣的日子，也是漸漸消散的日子，仍然出現 TA2 比 TA3 更高的日累積降雨值。總平均來看，暖化情境造成泰利颱風在 RCP4.5 情境下增加約 11% 的累積降雨；而 RCP8.5 卻減少了約 2% 的累積降雨。我們將進一步分析原因。

圖 5.11，為泰利颱風取全生命週期時間平均的降雨強度分布圖和差異圖，(a) 為 TA1 取 96 小時的時間平均，(b) 為 TA2 取 96 小時平均後減去圖(a)；(c) 為 TA3 取 96 小時平均後減去圖(a)。比較圖(b)和(c)，圖(b)在第一和第四象限離中心點超過 300 公里，降雨強度明顯降強；而圖(c)在中心正南方約 200 公里有較強範圍較大的強降雨帶。呼應前面可降水粒子的分布情境。也代表 RCP4.5 情境下北行的颱風有範圍較廣的降雨；而 RCP8.5 情境下，北行颱風強降雨帶較集中。因此，由於 RCP8.5 情境下，雨帶變得集中，導致降雨事件的格點數量變少，所以再進行格點平均時，會出現比 RCP4.5 情境少的情況。

圖 5.12 為泰利颱風模擬期間軸對稱之切向風、環流和垂直運動圖，圖(b)為 TA2-TA1，圖(c)為 TA3-TA1。圖(b)的部分，注意到中心在 6 公里高處有更強的上升運動，可能導致，離中心約 150 公里到 300 公里上升運動較 TA1 強，和圖 5.11(b)降雨強度差異分布的部分呼應。而圖(b)在 300 公里半徑以外，整體上低層內流增強，上升運動也增強，和圖 5.11(b)外圍環流降雨強度較 TA1 強的現象呼應。圖 5.12(c)為 TA3-TA1，颱風中心低層下沉運動增強，高層則上升運動增

強，離中心 150 到 300 公里，低層上升運動增強，和圖 5.11(c)的降雨強度差異分布呼應。注意到圖 5.12 的(c)，和(b)比較起來外圍的低層上升運動較弱，因此外圍環流帶來的降雨也相對較少。

(4) 台灣地區降雨比較

圖 5.13 為 6 月 18 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC 之 72 小時累積降雨。圖 (a)(b)(c)(d)分別是 CWB、TA1、TA2、TA3。(c)和(b)比較，南部山區有更多的累積降雨，而(d)則累積降雨比(c)少，可能是由於 RCP8.5 情境中，颱風靠近台灣地區時移動速度相較 TA2 快，且離台灣較遠導致。

圖 5.14 為台灣地區降雨強度樣本數和差異比，時間為 2012 年 6 月 19 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC，由圖中可以看出，弱降雨減少；強降雨增加的現象。尤其是在 TA3，雖然路徑離台灣較遠，但仍然給予台灣地區更多強降雨樣本。

5.3 水收支分析和小結

(1) 半徑降雨比較

圖 5.15，為半徑 400 公里內 TA1 降雨強度樣本數和 TA2 和 TA3 分別減去 TA1 後的差異比，橘色長條圖為 TA2-TA1、紅色長條圖為 TA3-TA1。先看到橘色長條圖的部分，在低於 14mmhr^{-1} ，弱降雨格點數減少；高於 14mmhr^{-1} ，強降雨格點數增加。在大於 50mmhr^{-1} 的強降雨樣本數，增加幅度甚至超過 60%。再來看到紅色長條圖的部分，在 40mmhr^{-1} 以下的降雨樣本數減少，而 50mmhr^{-1} 以上則大幅則加到約 60%。注意到 TA2 的弱降雨減少；強降雨增加的趨勢比 TA3 顯著，這可能和雨帶分布較廣泛有關，導致達到 50mmhr^{-1} 的格點數較 TA3 多。

(2) 水收支分析

為了進一步了解降水增加的原因。圖 5.16 為模擬 96 小時之泰利颱風全生

命期之半徑 400 公里內的水氣收支各項逐時變化圖，使用的方程式為(2.2.3)。
不同顏色的線條對應不同參數，參見其圖例。注意到，總水密度輻合率和降雨率的變化趨勢相似，代表兩者間呈現高相關。颱風的水氣主要由總水密度輻合率和蒸發率兩者提供；而降雨率和總水密度平流率為水氣離開颱風的兩因素。剩餘項和總水含量時間變率有相似的趨勢，可能為模式為的資料為一小時輸出一一次，每小時計算一次總水含量時間變率，實際上一小時內颱風內部有諸多雲物理現象發生，除非再縮短模式輸出資料的時間，否則無法減少誤差。

表 5.2 為 2012 年泰利颱風之 400 公里半徑內的水氣收支各項，經過格點和時間平均後的表格，紅色字體為方程式的主要項，注意到數量及最大的為總水密度通量輻合率和降水率兩項，代表降雨來源主要來自於總水密度通量輻合率，近一步探討細看總水密度通量輻合率，可分成六項，分別是水氣密度輻合率、降水粒子密度輻合率、雲粒子密度輻合率、水氣密度平流率、降水粒子密度平流率、雲粒子密度平流率。其中以水氣密度輻合率為主要貢獻項。注意到降雨率，TA2 和 TA3 比 TA1 降雨率更高，而 TA2 降雨率又比 TA3 更高，可能是前述的，由於 RCP4.5 情境下，TA2 的雨帶分布變得更廣大，而 TA3 變得集中，使得再進行格點平均的時候，TA3 因為降雨變得集中，降雨樣本數變少，進而在進行 400 公里半徑格點平均時，降雨率不及 TA2。

由於表格上只有進行 400 公里半徑內的探討，但是我們一樣希望能夠在不受誤差限制下，看到完整的水氣收支方程式中水氣的密度輻合率和密度平流率對降水的影響。圖 5.17，為降雨率的差異場和水氣密度通量輻合率的差異場的比對圖，可以注意到，在(a)和(b)中降雨強度為正值的地區，分別對應到(c)和(d)數值為正值的地區完全相符，因此可以說降雨率主要由水氣密度通量輻合率產生，而水氣密度通量輻合率又可以分成水氣密度輻合率和水氣密度平流率，在綜合表 5.2 中兩項的數值大小來看，可以得知降水率的增強是由水氣密度輻合率得來的。

水氣密度輻合率可以切割成水氣密度和風場輻合兩元素，由於水氣主要分

布於低層，因此我們將水氣密度和風場輻合垂直積分到 500hPa。表 5.3 和表 5.4，TA2 中，在 400 公里半徑內，水氣密度增加了約 14%，風場輻合增加了約 3%，到了 200 公里半徑，水氣密度增加約 15%，風場輻合增加約 3%，因此由水氣密度主導。在 TA3 中，400 公里半徑內水氣密度增加約 25%，風場輻合減少約 3%，到了半徑 200 公里內，水氣密度增加約 26%，風場輻合減少約 5%。而雨帶主要位於 200 到 300 半徑間，因此，由水氣密度主導。

(3) 小結

我們模擬了 3 組實驗，分別是 TA1、TA2 和 TA3，並比較其差異。路徑上 TA1 和 TA2 在 78 小時前差異不大，到了 78 小時後才分開；而 TA3 擇一開始就偏北，移動速度也較快。強度上和近中心最大風速上 3 個個案都沒有明顯差異。在雨帶結構上，TA2 擁有廣泛的雨帶；而 TA3 則擁有較集中的雨帶。在降水率上，TA2 相較 TA1 增加了約 12%；TA3 將較 TA1 只增加了 2%。TA3 降雨率增加較少主因和雨帶分布較集中有關。在降雨強度上，TA2 和 TA3 都擁有弱降雨減少；強降雨增加的趨勢。在使用水氣收支方程式分析降雨增加的來源，皆由總水密度輻合率來影響，而總水密度輻合主要因水氣密度增加導致。

第六章 個案三 (康芮颱風)

研究使用 CReSS 模式 3.4.2 版本，設定如表 2.2。控制組實驗代號為 KO1。

6.1 控制組實驗模擬結果

圖 6.1 為 NCEP GFS 分析場資料和 CReSS 模擬的風場和氣壓分布圖。比較 (a)和(b)、(c)和(d)，整體颱風的位置相似，大環流尺度相似。比較(e)和(f)，(f)比(e)的颱風中心位置稍微偏東一些，中心也略強。(g)和(h)，模擬的颱風也比 NCEP GFS 的中心強度略強，位置偏西一點。但整體上，大環境的風場和氣壓模是有掌握到。

圖 6.2 為 KO1 和 CWB 的路徑圖。注意到在 48 小時前，模式和觀測移動的位置和速度相似，直到 66 小時之後模擬比觀測移動較慢，且向東偏移約 1 度，直到 96 小時才逐漸靠近。

圖 6.3 為 KO1 和 CWB 的中心氣壓和最近中心最大風速的比較圖。(a)為中心氣壓比較圖，整體上模式和觀測差距不超過 10hPa，算是可以接受的範圍內。在強度上，KO1 的風速相較 CWB 有較強的風速，差異最大的期間為第 30 小時，約強了 $10(\text{ms}^{-1})$ 。在 48 到 72 小時間，模擬也比觀測強了約 $10(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

圖 6.4 為 NRL 衛星資料和 KO1 的雨帶結構比較，(a)中，強降雨帶為片狀，位於約 120E 到 125E、14N 到 18N，降雨強度較強的地方為 122E 到 124E、16N 到 18N，和(b)中的位置 122E 到 124E、16N 到 19N，位置相似。圖(c)，雨帶可以分成東西兩區，和(d)的分佈相似，只是(d)分為東西以外，中間還有一強降雨帶。在圖(e)和(f)比較，(e)強降雨帶分成 2 區，位於台灣西南方和東南方；而(f)則為螺旋狀，位於台灣東南方海域。整體上模式的雨帶位置和 NRL 衛星觀測資料相似。有不錯的掌握。

在台灣地區日累積降雨的部分，如圖 6.5。(a)(c)為 CWB 觀測資料，(b)(d)為 KO1 模擬結果。由於 KO1 模擬在 28 日時，在 1800 UTC 偏離台灣，因此日

累積降雨較偏山區。在 29 日時，也是相同的情況，颱風相較觀測偏東，因此日累積雨量主要分布在西部平原和山區，東半部也有高估現象。

6.2 疊加氣候差異場後的敏感度實驗結果

敏感度實驗只將控制組模擬的初始和邊界條件，疊加 RCP4.5、RCP8.5 情境，實驗代號分別是 KO2、KO3。

(1) 路徑、強度、風速比較

在路徑上差異，圖 6.6 為 CWB、KO1、KO2 和 KO3 的路徑，在模擬第 72 小時前 KO1 和 KO2 沒有太多的差別；而 KO3 則一開始就偏東。直到模擬第 72 小時，KO2 開始偏西，KO3 則和 KO1 的路徑相似，但移動速度偏快。在路徑差異的原因，和前面兩個個案相似，RCP4.5 情境高層在台灣北方有強勁的東北東風，使 KO2 偏西；而 RCP8.5 情境下，低層有足夠的強勁西南風，足以抵抗高層的東北風，使颱風路徑偏西偏北。

在中心氣壓和近中心最大風速的部分如圖 6.7，康芮這個個案中，氣壓沒有太大的差異，而風速則以 KO3 為最強，但也並非全部時段都超過 KO2、KO1。例如模擬第 72 小時，KO3 的風速較 KO2、KO1 弱。

(2) 雨帶結構比較

在雨帶結構差異上，我們以降水粒子作為參數來比較。圖 6.8，由上分別為同一個時間的 KO1、KO2 和 KO3。在(a)(b)(c)模擬 12 小時差異還不明顯。(d)(e)(f)，看到 KO3 已經明顯的雨帶集中於中心；而 KO2 和 KO1 還沒有明顯的差異。到了(g)(h)(i)階段，是 28 日 0000 UTC，已經出現 KO2 較 KO1 雨帶集中於颱風中心，並且可降水粒子更多。KO3 則甚 KO2 為集中。到了(i)(j)(k)，KO2 颱風離台灣較靠近，因此雨帶集中在台灣山區；而 KO3 則和 KO1 相似分布，但相較下可降水粒子混和比更高。

圖 6.9 為康芮全生命週期的可降水粒子(a)KO1 平均(b)KO2-KO1(c)KO3-KO1 的混和比。注意到(a)，康芮颱風的可降水粒子主要分布在第三象限。

(b)KO2-KO1，注意到可降水粒子集中在從(0,0)向西 300 公里，向南 200 公里均達到 0.4 到 0.5gkg⁻¹之數值。而(c)KO3-KO1，則中心點可降水粒子減少，在中心的西南方約 100 公里，可降水粒子差異也是負值。其餘在西南方 200 公里內的可降水粒子差異皆為正值，數值來到約 0.4 到 0.5 gkg⁻¹。整體上，RCP4.5 情境下，康芮颱風的雨帶有向中心集中的特性；而 RCP8.5 情境更向中心集中。

(3) 降水差異比較

在降雨強度差異上，圖 6.10 為 500、400、300、200 公里取格點平均的逐時降雨強度圖。前六小時，降雨強度瞬間提高，代表模式需要時間去計算降水。在圖(a)和(b)，由 KO2 降雨強度的數值最強；圖(c)(d)為 KO3 最強。代表在 RCP4.5 情境下，降雨增強；RCP8.5 情境下，降雨集中於半徑 200 到 300 公里。也注意到，200 公里半徑內的降雨強度是所有半徑內平均後最高的。

表 6.1 為取格點平均後的日累積降雨，分別取 500 公里和 200 公里平均，8 月 26 日，颱風仍然為熱帶性低氣壓，在 KO2 和 KO3 皆比 KO1 日累積降雨來的少。到了 8 月 27 日，格點平均日累積降雨不論半徑取多少，皆為 KO2 大於 KO3 大於 KO1。8 月 28 日，靠近台灣的期間，所有情境皆在 200 公里半徑內達到最大的日累積降雨，注意到 KO3 的差異比，KO3 相較其他情境的模擬，離台灣較遠，但是在取 500 公里格點日平均累積降雨時，卻是相對 KO1 漸少的；而取 200 公里半徑時卻是增加約 15%，代表強降雨相較集中。到了 29 日，KO3 因為向東移動，少了地形的影響而格點平均的日累積降雨差異比不論是取 500 公里還是 200 公里，均為負成長。而 KO2 則因為向西移動，受台灣、大陸的地形作用後，格點平均的日累積降雨差異比大幅提高，在 200 公里半徑內甚至提高到 280%。

進一步分析降雨強度的雨帶位置，由圖 6.11(b)為 KO2-KO1，(c)為 KO3-KO1。注意到(b)降雨強度增强的主要位置分布在第三象限的 200 公里半徑內，

和前敘述的圖 6.9 可降水粒子分部的位置相同。圖(c)則位於南方第 100 到 200 公里內。在外圍環流造成降水部分，仍然是以(b)來的廣泛。

又近一步分析為什麼主要雨帶都位於 200 公里以內。圖 6.12 為軸對稱圖，(b)為 KO2-KO1，注意到，垂直次環流在半徑 100 到 400 公里內明顯增強，而上升運動在半徑 100 公里到 200 公里處增加幅度最顯著，可以解釋為什麼圖 6.11(b)的雨帶分部主要位於半徑 200 以內。(c)為 KO3-KO1，注意到中心有在 2 到 10 公里高度有更強的上升運動，颱風眼牆的部分有更強的下沉運動，半徑第 100 到 200 公里有更強的上升運動，可以對應到圖 6.11(c)。KO2 和 KO3 在 100 到 200 公里半徑內的上升運動增強，可以解釋為什麼前面敘述的圖 6.10 中，格點平均降雨強度在 200 公里內所有的敏感度實驗都在此半徑數值達到最高的原因。

(4) 台灣地區降雨比較

圖 6.13 為台灣地區 8 月 28 日 0000 UTC 到 30 日 0000 UTC 之 48 小時累積雨量圖，(a)(b)(c)(d)分別為 CWB、KO1、KO2、KO3。KO2 的路徑在 72 小時之後比 KO1 來的靠近台灣，因此累積降雨不止有南部山區平原，整個台灣山區都有超過 700mm 的累積降雨。而 KO3 則一開始就偏東，離台灣較遠，因此只有颱風外圍環流影響台灣地區，僅在部分山區造成超過 700mm 的累積降雨。

為了探討台灣地區的降雨強度，圖 6.14 為 28 日 0000 UTC 到 30 日 0000 UTC 的台灣地區降雨強度樣本數和差異比。注意到 KO2 在模擬到第 72 小時後，較 KO1 靠近台灣，加上擁有更多水氣，因此出現弱降雨減少；強降雨增加現象。而 KO3 將較於 KO1，一開始就偏西，使得 KO3 僅外圍環流引入的水氣影響台灣地區，因此台灣地區的降雨強度樣本數全部都比來的少。

6.3 水收支分析和小結

(1) 半徑降雨比較

圖 6.15 為康芮颱風在半徑 500 公里內的降雨強度 KO1 樣本數和 KO2-

KO1、KO3-KO1 的差異比。由於 KO2 和 KO3 在模擬到 72 小時後路徑相差甚大：KO2 向西；KO3 向東。因此在比較降雨強度樣本數的時候，分成 72 小時前、72 小時之後來討論。圖(a)為 72 小時前，在 500 公里半徑內，KO2 的差異比從 12 mmhr^{-1} 以上，差異比就轉為正值。而 KO3 則在 35 mmhr^{-1} 以上才轉為正值。RCP4.5 情境下，強降雨的樣本數比 RCP8.5 情境來的多的現象，在之前也有發生。圖(b)為 72 小時之後，由於 KO2 向西移動，且移動速度變緩慢，受到台灣和中國地形影響造成豪大雨，因此強降雨的樣本數較 KO1、KO3 多出許多；相反的，KO3 向東移動到海上，因此少了地形影響，降雨事件的樣本數大幅減少。

(2) 水氣收支分析

同樣的，我們想了解降水增加的原因，使用和前面幾章同樣的方法來探討康芮颱風。圖 6.16 為 500 公里半徑內水氣收支方程式各項參數逐時變化圖。同樣的，總水密度輻合率的曲線和降水率的曲線有高度的相關。而剩餘項也和總水含量時間變率有高度相關。蒸發率保持正值且平穩不振盪，代表持續的給颱風水氣，總水密度平流率為負值，代表持續地將水氣平流出去。整體上，KO2 降水率約比 KO1、KO3 來的高。

表 6.2 為康芮颱風水氣收支各項，同樣地，紅色字體為主要項，其餘為細項或誤差項。仍然可以看到，以總水密度通量符合率和降水率為兩個數量及最大的項。降水率是水氣離開颱風的主要項；而總水密度通量輻合率為颱風獲得水器的主要項，其細項中又以水氣密度輻合率為量級最大項。其中 KO2 降水率增加約 21%，KO3 則減少 8%。此結果可能和路徑差異有關。

為了更進一步知道總水密度通量輻合率和降水率的在空間分布的相關性，圖 6.17 為降雨強度差異和水氣密度通量輻合率的差異分布圖。如前一個案，(a)為紅色的區域(降雨強度差異大於 6 mmhr^{-1})和(c)為紅色的區域(水氣密度通量輻合率的差異大於 $8 \text{ kgm}^{-2}\text{hr}^{-1}$)幾乎相同位置。(b)和(d)也有一樣的現象。

為了進一步了解是水氣密度增加還是風場輻合導致降雨率增減的原因。表 6.3、6.4 和 6.5 分別為半徑 500、400、300 公里垂直積分至 500hPa 的水氣密度和風場輻合的時間和格點平均的表格。在 KO2，取 500、300、200 公里，水氣密度差異比不變，而風場輻合卻不斷改變，因此主要由風場輻合影響降雨率。在 KO3，由於水氣密度增加比率隨半徑減少，風場輻合隨半徑增加，但仍然為負值，強降雨帶位於半徑 200 公里以內，因此水氣密度為主要因素。

(3) 小結

我們模擬了 KO1、KO2 和 KO3，三種情境，在路徑上，KO3 偏西，KO2 和 KO1 在模擬 72 小時前，KO2 偏東。在颱風強度部分，三種情境中強度差不多。在降雨強度部分，KO2 和 KO3 均有弱降雨事件減少，強降雨事件增加。但由於路徑差異，KO2 比 KO3 強降雨事件多許多。在雨帶分布方面，KO3 最為集中於颱風中心，KO2 最為廣泛。在台灣地區累積降雨中，由於 KO2 較 KO3 靠近台灣且 72 小時後向西偏移，台灣日累積降雨和 48 小時累積降雨均由 KO2 遠大於 KO1。

以水氣收支方程式來在探討颱風水氣來源，KO2 降雨率增加 21%，KO3 則減少 8%。同上個一個案，主要由總水密度輻合率來影響台風的降雨率。而近一步將水去輻合率分解為兩元素：水氣密度和風場輻合，分析後發現在 KO2 主要以風場輻合為主因；KO3 主要以水氣密度為主因。

第七章 個案四（鳳凰颱風）

研究使用 CReSS 模式 3.4.2 版本，設定如表 2.2。控制組實驗代號為 FU1。

7.1 控制組實驗模擬結果

圖 7.1 為 NCEP GFS 和 CReSS 模擬風場和氣壓的比較圖，(a)(b)為同一時間點，(c)(d)為同一時間點，以此類推。由圖 7.1 可以看出模式充分掌握了大環境的風場和氣壓場，唯獨不同點為，9 月 21 日 1200 UTC，模式和 GFS 的颱風位置明顯不同：模式移動較快，先移動到了台灣北部。

圖 7.2 為鳳凰颱風之路徑比較圖，整體上模式的路徑和 CWB 觀測的路徑差不多，為獨在 48 到 96 小時間，模式沒有在菲律賓打轉，並且快速從台灣東岸北上，登入台灣北部後，持續北上，在模擬到 96 小時和觀測路徑會合。

在中心氣壓和最大風速比較的部份，為圖 7.3。強度上有不錯的掌握，和觀測差異最大不超過 10 hPa。最大風速的部份，模擬有高估的現象，在模擬 78 小時前大約高估了約 10 到 15 ms^{-1} 。

在雨帶結構得分佈，如圖 7.4，唯獨 9 月 20 日模式移動較快，雨帶已經來到台灣東南方海域，NRL 衛星資料還停留在台灣南南西方海域。整體上模式隊與雨帶有不錯的掌握。

在台灣地區日累積降雨的部分如圖 7.5，由於模式在靠近台灣時移動速度較快，加上穿越台灣北部，導致降雨分佈和觀測資料不同。但是如果比較 72 小時累積降雨，會發現模式有掌握到南部的強降雨。雖然在觀測在宜蘭地區的降雨模式有些許的偏移，山區降雨有高估的現象。但是本研究並非專注在降雨分佈，而是在捕捉降雨強度，因此這誤差仍然算可以接受的。

7.2 疊加氣候差異場後的敏感度實驗結果

敏感度實驗只將控制組模擬的初始和邊界條件，疊加 RCP4.5、RCP8.5 情境，實驗代號分別是 FU2、FU3。

(1) 路徑、強度、風速比較

在路徑上，圖 7.6 為鳳凰颱風 CWB、FU1、FU2 和 FU3 的路徑圖。在模擬第 72 小時之前，三種情境的路徑都差不多。但是到了 72 小時以後，FU1 和 FU2 路徑相較 CWB 偏西，而 FU3 則和 CWB 路徑相仿。一直到約 120 小時以後，FU3 開始偏西，FU1 和 FU2 開始偏東。

在強度上，RCP4.5 和 RCP8.5 情境下對於鳳凰颱風的強度影響不顯著。如圖 7.7。在風速上，整體上也並沒有特別增強或減弱的現象。

(2) 雨帶結構比較

雨帶差異的部份，以 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和比於垂直方向加總來分析。在圖 7.8 之(a)(b)(c)，就可以看出和前面個案相同的情況：FU2 擁有廣泛的雨帶分部，FU3 雨帶最為集中。到了(d)(e)(f)，以 FU1 雨帶最為廣泛，FU3 最為集中。在之後的 20 日(g)(h)(i)和 21 日(j)(k)(l)，都有相似的情形。

圖 7.9 為鳳凰颱風生命週期共 144 小時之(a)降水粒子混合比(b)FU2-FU1(c)FU3-FU2 之差異比。同樣如前面幾個個案，鳳凰也出現 RCP4.5 情境下可水粒子比 RCP8.5 情境來的分散而廣泛。

(3) 降水比較

圖 7.10 可以看得出來，在 400 公里半徑內，約模擬 65 小時前降雨強度 FU2 大於 FU3，到了 65 小時以後，FU3 降雨強度大於 FU2。這現象在 300 公里半徑內也看得出來。這時間點大約是靠近台灣的時間點。代表此時刻 FU3 給予台灣附近地區更多的強降雨事件。在圖(c)中，約 65 小時降雨強度大幅下降，代表此時刻降雨主要分布在 200 到 300 公里半徑之間。可能是颱風中心受到台灣地形影響導致：水氣向中心輻合時再半徑 200 到 300 公里間，由於受到地形影響抬升後凝結成雲雨帶導致。

表 7.1 為格點平均日累積降雨和總平均。在取 400 公里半徑時，FU2 不

論是在模擬初期的 9/18、19 日，或是靠進台灣的 9/20、21 日，遠離台灣的 22 日，末期的 23 日，格點平均日累積均為增加約 5-17%，23 日更增加了 35%。總格點平均為增加 11% 的累積降雨。在 FU3，僅在靠近台灣的 21 日增加約 20%，總平均增加約 6%。在 200 公里半徑內，FU2 增加的比例顯著，；而 FU3 約略增加。在靠近台灣的 21 日增加 3%，遠離台灣的 22 日，增加了約 19%，末期由於登入中國而減少約 41%，總平均約增加 2% 的累積降雨。

圖 7.11 為鳳凰颱風完整生命週期的降雨強度 FU1 之平均和 FU2-FU1、FU3-FU1 之差異場。同樣可以看出：FU2 外圍環流所帶來的降雨相較 FU3 來的廣泛，尤其是在第一象限最顯著；而 FU3 在 200 半徑公里內部有較 FU2 強之雨帶位於約(0,-200)地區。

圖 7.12，為鳳凰颱風完整生命週期之軸對稱圖，注意到圖(b)中，低層的內流增強和高層的外流增強，使的約在離中心 100 到 200 公里間有更旺盛的上升運動，在 400 到 500 公里間有微弱之下沉運動，加強了颱風垂直次環流之發展。在圖(c)中，一樣在 100 到 200 公里有稍強之上升運動，到了離中心 400 到 500 公里有稍強之下沉運動，一樣強化了颱風的垂直次環流，只是相較 FU2 弱。而外也可以注意到，對應到圖 7.10 和 7.11，上升運動較強的地區，也伴有較強的降雨帶。

(4) 台灣地區降雨比較

圖 7.13 為台灣地區 72 小時累積降雨圖，注意到 FU3 給予台灣中南部山區更高的累積雨量。遠超過 FU2 和 FU1。

圖 7.14，為台灣地區在鳳凰颱風侵台時期(9 月 20 0000 UTC 到 22 日 0000 UTC)，降雨強度樣本數和差異比。注意到此個案和前者不同，FU3 比起 FU2，給予台灣地區更多的強降雨樣本數。可能是在靠近台灣的路徑，此個案相較於他個案，FU2 和 FU3 的路徑差異較小，更能夠看出 RCP8.5 情境比起 RCP4.5 情境下，擁更多的水氣，能夠給予台灣更多的強降雨樣本。

7.3 水收支分析和小結

(1) 半徑降雨比較

圖 7.15 為半徑 400 和 200 公里之降雨強度樣本數和差異比。在半徑為 400 公里的圖(a)，可以看出 FU2 差異從 18 到 20 mmhr⁻¹ 差異比開始為正值。大於 50 mmhr⁻¹ 有顯著的增加。FU3 則從 24 到 26 mmhr⁻¹ 差異比開始轉變為正值。和前面的個案一樣：有弱降雨樣本減少；強降雨樣本數增多的特性。在半徑為 200 公里的圖(b)，也出現上述的特性，但注意到在 200 公里半徑內，FU2 的差異比遠大於 FU3 的差異比。這是和 400 公里不同的地方。其原因可以追溯到圖 7.11。注意到在 7.11 圖(b)和(c)，FU2 中內的降雨強度差異中，在半徑 200 公里中有兩個強降雨帶分別為位於南側和北側；而圖(c)中，半徑 200 公里內景有一個強降雨帶位於南方。但注意到他的差異直超過 8 mmhr⁻¹，比圖(b)中的強降雨帶還要更強。

(2) 水收支分析

如前面幾個個案所示，為了瞭解降雨增加的原因。表 7.2，為 400 公里半徑內水氣收支方程式中各項。主要以降水率、蒸發率、總水密度通量輻合率和總水含量時間變率四項為主要項。主要項中以降水率和總水密度輻合率數值為最大。注意到，在降水率項 FU2 增加了 10%；而 FU3 增加了約 5.5%。這原因如前面所敘述，FU2 擁有較廣泛的雨帶導致。而蒸發率為給予颱風水氣來源之一，注意到 FU2 的蒸發率相較 FU3 有略高，和前面的個案相同。表中總水密度通量輻合率為正值且數量值最大，代表其為主要影響降水率的項目。而總水密度通量輻合率又可以切開成 6 個細項，其中以水氣密度輻合率為最大。代表水氣密度輻合率為主要影響的項目。

圖 7.16 為水氣收支各項逐時變化圖。同前幾個個案，降雨率和總水密度輻合率變化的趨勢完全一樣，代表降雨率主要由總水密度輻合率主導。而剩餘項和總水含量時間變率變化趨勢相當代表剩餘項和模式輸出的頻率有關，提高頻

率可以降低誤差。

圖 7.17 鳳凰颱風全生命週期的降雨強度差異如圖(a)(c)，和水氣密度通量輻合率如圖(b)(d)。(a)(b)為 FU2-FU1，(c)(d)為 FU3-FU1。由(a)(b)比對可以發現，在(a)有強降雨帶的地區，在(b) 水氣密度通量輻合率的數值也較大。比對(c)和(d)也可以發現同樣的結果。

同樣的，總水密度輻合率可以分成水氣密度和風場輻合兩元素。表 4.3 和 4.4 分別為取 400 公里和 200 公里的水氣密度和風場輻合的圖。FU2 降雨率由 400 公里到 200 公里的轉變為：11%到 17%，而水氣密度差異從 19.5%變為 17%，風場輻合從 12.6%變為 14%，代表降水率由風場輻合主導。而 FU3 降水率從 400 公里到 200 公里轉變為：6%到 2%。而水氣密度差異從 30%變為 28%，風場輻合從 8.6%變為-2%，代表降水率由水氣密度主導。

(3) 小結

我們模擬了 FU1、FU2 和 FU3，在強度和風速上差異不明顯，在路徑上差異不明顯，直到 120 小時候 FU3 和 FU2 偏西。在雨帶差異上，FU2 較廣泛、FU3 較集中。在累積降雨取 400 公里半徑的部分，FU2 增加約 11%，FU3 則增加 6%。在降雨強度上，同樣有弱降雨式樣北數減少；強降雨樣本數增加的情況。在取 400 公里半徑內進行水氣收支計算，FU2 降水率增加 10%，FU3 增加約 5.5%。在水氣來源主要都是因為水氣密度輻合率導致，近一步將水氣密度輻合率分解成水氣密度和風場輻合兩元素。我們得知此個案在 FU2 時由風場輻合為主導；FU3 時由水氣密度主導。

第八章 討論

在個案一(梅姬)中，我們看到了 RCP4.5 情境下，梅姬颱風雨帶分布更廣泛，在 500 公里半徑內日累積雨量增加約 20%，大於 50mmhr^{-1} 的樣本數增加約 70%，降雨率增加約 19%。而 RCP8.5 情境下，雨帶變得集中，在 500 公里半徑內日累積雨量增加約 9%，大於 50mmhr^{-1} 的樣本數增加約 80%，降雨率增加約 8%。由於受到差異風場的影響，原本位於台灣北部的遠距降雨北移離開了台灣。在降雨率的差異上，主要由水氣密度輻合率增加導致，而進一步分析水氣密度輻合率，得到以水氣密度增加為主因。

個案二中(泰利)，在 RCP4.5 情境，在 400 公里半徑下，泰利颱風增加約 11% 的累積降雨，大於 50mmhr^{-1} 的樣本數增加約 70%，降雨率增加約 12%；在 RCP8.5 情境下，減少了約 1.8% 的累積降雨，大於 50mmhr^{-1} 的樣本數增加約 55%，降雨率增加約 2%。由於受到風場差異的影響，在路徑上 TA3 偏北。在降雨率增加的主因，由水氣密度輻合率主導，進一步分析水氣密度增加的原因，則由於水氣密度增加為主要因素。

在個案三中(康芮)，在 RCP4.5 情境，在 400 公里半徑下，康芮颱風增加約 57% 的累積降雨，在 2013 年 8 月 26 日到 29 日中，大於 50mmhr^{-1} 的樣本數增加約 42%，降雨率增加約 21%；在 RCP8.5 情境下，減少了約 6% 的累積降雨，大於 50mmhr^{-1} 的樣本數增加約 33%，降雨率減少約 8%。由於受到風場差異的影響，在路徑上 KO2 在移動到 26N 以北後偏西。在降水率增加的原因，主要由水氣密度輻合率主導，進一步分析水氣密度輻合率，則發現在 KO2，由風場輻合主導降雨率；在 KO3 則以水氣密度主導降水率。

個案四(鳳凰)中，在 RCP4.5 情境，在 400 公里半徑下，鳳凰颱風增加約 11% 的累積降雨，大於 50mmhr^{-1} 的樣本數增加約 71%，降雨率增加約 10%；在 RCP8.5 情境下，增加約 6% 的累積降雨，大於 50mmhr^{-1} 的樣本數增加約 76%，降雨率增加約 5.5%。由於受到風場差異的影響，在路徑上 FU3 在約模擬

到 120 小時之後登入中國大陸。降水率增的因素，主要由水氣密度輻合率主導。進一步分析水氣密度輻合率，FU2 由風場輻合主導；FU3 則由水氣密度主導。

注意到了 RCP4.5 情境下，降水率都比 RCP8.5 情境來的多，在颱風的軸對稱圖中，RCP4.5 情境下的上升運動比起 RCP8.5 情境來的旺盛，對流發展的更高，尤其在康芮、泰利、鳳凰都可以看到這個現象。背後的原因可能為：在未來情境下，低層均為增溫的現象，導致地表眼牆地區上升運動增強。但越高層溫度上升的越多，因此越高層的大氣越趨向穩定。圖 8.1 為 RCP4.5(橘色)和 RCP8.5(紅色)，選取 110E 到 150E 和 5N 到 25N 範圍中進行平均計算後的垂直方向的增溫率。

未來的暖化情境給予颱風更多的水氣，能夠釋放更多的潛熱使的颱風朝向更暖心的結構發展，使的垂直次環流有增強的現象。在圖 8.1 中，500 hPa 以上，RCP8.5 情境下，大氣的穩定度比起 RCP4.5 情境更加的穩定，可能使得眼牆的上升運動在 RCP8.5 情境下無法超過 8 公里高。

另外，李茂正(2015)提到，康芮颱風由於背景場垂直風切過大(為東北向西南之風切)，低層和高層的中心分離，使得颱風無法繼續增強，僅成長為輕度颱風。這也使的颱風的雨帶位於南側，出現不對稱現象。在 RCP8.5 未來情境下，底層有西南風分量，中高層有東北風分量，垂直風切為東北向西南方向，加劇康芮颱風的背景垂直風切，使得垂直環流在 RCP8.5 情境下，眼牆的上升運動增強現象無法達到高層；而相較於 RCP4.5 情境，背景場之垂直風切並沒有 RCP8.5 來的大，因此上升運動較沒有受到阻礙。泰利颱風在 17 到 19 日也同樣的為東北向西南之風切(如圖 8.2，泰利颱風位於左下方)，擁有不對稱之雨帶結構，因此猜測為同個緣由導致在 RCP8.5 情境下有相同的狀況發生。

梅姬颱風則可能因為其強度夠強，結構對稱，較沒有受到未來情境的垂直風切之影響。使其在 RCP8.5 情境下，擁有更多水氣釋放潛熱，使得垂直次環流更加旺盛。

第九章 結論

本研究主要是將過去曾經發生的颱風，在模式上重現後，在初始和邊界條件疊加上未來差異的數值，利用此方法試著將同樣的颱風放在未來 100 年後來觀察它的演變，並排除其他不可確定性，定量出同個颱風在現在和未來兩種情境下的差異。

在進行了 38 個 CMIP5 氣候模式的個別平均並且在取平均後，我們看到了未來 21 世紀末對比現在的氣候差異場，在 1000 hPa 低層，RCP4.5 情境下西北太平洋區域溫度增加約 1.6°C 到 2°C，RCP8.5 情境下溫度增加約 3.2°C 到 4.8°C。在溼度上，RCP4.5 情境增加約 1.6 到 2.2 gkg⁻¹，RCP8.5 情境下增加約 3.7 到 4 gkg⁻¹ 以上。在風場上，在 1000 hPa 低層為西南風分量，在 850 hPa 為西風分量，到了高層轉為東北風分量。這些差異和 IPCC AR5 中的報告相似，並將會改變颱風的路徑或雨帶分布。

所有的個案都有共通的現象：弱降雨事件減少；強降雨事件增加。且 RCP4.5 情境下雨帶分部較廣泛；RCP8.5 情境下雨帶分部較集中。因此在計算格點平均的數值，RCP4.5 情境下的降水率、降雨強度樣本數、日累積降雨都會比 RCP8.5 算出來的數值來的高。但若實際上去觀看分佈圖，會發現 RCP8.5 降雨集中於眼牆，其降雨強度增加幅度不輸給 RCP4.5 情境，不容小看。這點是和李孟軒(2018)研究中：RCP8.5 情境下強降雨樣本數和降雨率多於 RCP4.5 情境的結果不一致的地方。且北行颱風路徑上或雨帶上多少因為氣候差異值而轉變，如個案一，台灣北部的遠距降雨在 RCP8.5 情境下北移到了海外等等情境。這點也是李孟軒(2018)研究中不太一致的地方。可能代表北行的颱風，和西行的颱風在未來情境下會有不一樣的特性。而這些特性，反應在垂直運動上：RCP4.5 比 RCP8.5 情境，眼牆的高層(8 公里高)上升運動較旺盛。但本研究僅有四個個案，無法直接下定論。希望未來有機會研究更多的個案來探究北行颱風在未來 RCP4.5 和 RCP8.5 的情境下的特性轉變。

參考文獻

王尹懋、陳正達、張智昇、駱世豪，2015：氣候變遷影響下台灣之颱風降雨分布 第一部分：數值模式控制實驗之效驗。大氣科學期刊，第 43 期第 2 號。

林定宜，2012：民國 101 年颱風調查報告—第 5 號泰利(Talim)颱風(1205)，民國 101 年颱風調查報告，頁 1-10。

林秉煜，2013：民國 102 年颱風調查報告—第 15 號康芮(Kong-Rey)颱風(1315)，民國 102 年颱風調查報告，頁 1-10。

李孟軒，2018：未來長期氣候變遷對西行颱風個案降雨之影響。國立台灣師範大學地球科學研究所碩士學位論文。

李茂正，2015：康芮颱風(2013)結構演變與對流發展降水關係之研究。國立台灣師範大學地球科學研究所碩士學位論文。

商俊盛，2010：民國 99 年颱風調查報告—第 13 號梅姬(Megi)颱風(1013)。民國 99 年颱風調查報告，頁 1-10。

張鳳茹、黃婉如、王重傑，2015：長期氣候變遷對長江流域暖季東移雨帶的影響與評估：以 2009 年 5 月為例。大氣科學期刊，第 43 期第 4 號。

簡芳菁、楊筑方，2009：北行颱風伴隨西南氣流之研究。大氣科學，第 37 期第 1 號。

廖思瑩，2013：颱風對台灣地區遠距降雨之影響—梅姬和馬鞍颱風個案分析。
國立台灣師範大學地球科學研究所碩士學位論文。

蘇世顥、陳郁涵、楊憶婷、徐理寰、郭鴻基，2017：氣候變遷下台灣颱風豪雨
之變化與機制探討。

Bi M., T. Li, M. Peng, Shen .X, 2015：Interaction between Typhoon Megi (2010) and
a Low Frequency Monsoon Gyre. *J. Atmos. Sci.*, 72,2682-2701.

Bengtsson, L., M. Botzet, and M. Esch, 1996: Will greenhouse gas-induced warming
over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes?
Tellus, 48A, 57-73

Harris M. L., and Lin S. J., 2016：High-resolution climate simulation using GFDL
HiRAM with a stretched global grid. *J Clim* 29:4293-4313.

Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2013: The Physical
Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the
Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F Stocker et al., Eds.

Kanada S., T. Takemi, M. Kato, et al ,2017：A multimodel intercomparison of an
intense typhoon in future, warmer climate by four 5-km-Mesh Models. *J Clim* 30:6017-
6034.

Knutson, T. R., and S. Manabe, 1998: Model assessment of decadal variability and
trends in the tropical Pacific Ocean. *J. Climate*, 11,2273-2296.

Knutson, T. R., and R.E. Tuleya, 1999: Increased hurricane intensities with CO₂-induced warming as simulated using the GFDL hurricane prediction system. *Climat Dyn.*, in press.

Meehi G. A., F. Zwiers, J. Evans, T. Knutson, L. Mearns, and P. Whetton, 2000 : Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bull. Amer. Meteor.*, 81, 427-436.

Tsou, C.H., P. Y. Huang, C. Y. Tu, C. T. Chen, T. P. Tzeng, and C. T. Cheng, 2016 : Present simulation and future typhoon activity projection over western North Pacific and Taiwan/East Coast of China in 20-km HiRAM climate model. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 27, 687-703.

Wang CC, Lin BX, Chen CT, Lo SH, 2014 : Quantifying the effects of long-term climate change on tropical cyclone rainfall using a Cloud-Resolving Model: examples of two landfall typhoons in Taiwan. *J Clim* 28:66-85.

序號	模式	發展模式機構	國家
1,2	ACCESS1.0 , ACCESS1.3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation ,Australia and Bureau of Meteorology	澳洲
3,4	BCC-CSM1.1 , BCC- CSM1.1(m)	Beijing Climate Center , China	中國
5	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	加拿大
6	CCSM4	National Center for Atmospheric Research	美國
7,8	CESM1(BGC) , CESM1(CAM5)	National Science Foundation ,Department of Energy, National Center for Atmosphere	美國
9,10	CMCC-CM , CMCC- CMS	Centre Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	義大利
11	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques/Centre Europeen de Recherche et Formatopn Avancees en Calcul Scientifique	法國
12	CSIRO-Mk3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	澳洲
13,14	FGOALS-g2 , FGOALS-s2	LASG, Insititute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences ; and CESS, Tsinghua University	中國
15	FIO-ESM*	The First Institute of Oceanography, SOA	中國
16	GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	美國
17,18	GFDL-ESM2G , GFDL- ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton University Forrestal Campus	美國
19,20, 21,22	GISS-E2-H , GISS-E-H- CC , GISS-E2-R , GISS-E2-R-CC	NASA Goddard Institute of Oceanography ,SOA	美國
23	HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration	韓國
24	HadGEM2-ES	The European Network for Earth System modelling	目前有比 利時、德 國、英 國、保加 利亞、丹 麥、法

			國、愛爾蘭、義大利、挪威、波蘭、荷蘭、西班牙、羅馬尼亞、瑞典、瑞士
25	HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre	俄羅斯
26	INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	法國
27,28,29,	IPSL-CM5A-LR , IPSL-CM5A-MR , IPSL-CM5B-LR	Institute Pierre-Simon Laplace	日本
30	MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	日本
31,32	MIROC-ESM-CHEM* , MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, and National Institute for Environmental Studies	日本
33,34	MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology	德國
35,36	MRI-ESM1 , MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	日本
37,38	NorESM1-M*,NorESM1-ME	Norwegian Climate Centre	挪威

表 2.1。為本研究所選用的 CMIP5 模式的列表，其中打*代表沒有 RCP4.5 情境的資料。

	個案一(梅姬颱風)	個案二(泰利颱風)	個案三(康芮颱風)	個案四(鳳凰颱風)
格點設定	1368 × 1368	1152 × 1152	1152 × 1152	1368 × 1368
水平解析度	2500 m	2500 m	2500 m	2500 m
垂直層數	50	50	50	50
垂直網格間距	50~779.5 m 平均為 500 m	50~779.5 m 平均為 500 m	50~779.5 m 平均為 500 m	50~779.5 m 平均為 500 m
模擬時間	186 小時	96 小時	102 小時	144 小時
初始時間	2010 年 10 月 16 日 0600 UTC	2012 年 6 月 17 日 0000 UTC	2013 年 8 月 26 日 0000 UTC	2014 年 9 月 18 日 0000 UTC
初始和邊界條件	NCEP GFS 0.5° × 0.5°每六小 時一筆	NCEP GFS 0.5° × 0.5°每六小 時一筆	NCEP GFS 0.5° × 0.5°每六小 時一筆	NCEP GFS 0.5° × 0.5°每六小 時一筆
海溫	ERA-interim 0.75° × 0.75° 每六小時一筆	ERA-interim 0.75° × 0.75° 每六小時一筆	ERA-interim 0.75° × 0.75° 每六小時一筆	ERA-interim 0.75° × 0.75° 每六小時一筆
微物理過程	冷雲過程	冷雲過程	冷雲過程	冷雲過程

表 2.2。為四個個案的模式設定。

500 km								
	10/17	10/18	10/19	10/20	10/21	10/22	10/23	7 天平均
ME1	61.4335	61.1509	79.33857	71.4902	55.0672	33.5985	16.7619	54.1201
ME2	71.3501	71.3613	92.34133	86.1509	65.4718	45.8449	20.8735	64.7706
差異比	16%	17%	16%	21%	19%	36%	25%	20%
ME3	63.8552	62.8999	84.25788	80.7343	60.7845	43.5173	15.0673	58.7309
差異比	4%	3%	6%	13%	10%	30%	-10%	9%
200 km								
ME1	203.37	215.5604	275.9174	281.009	233.5963	155.209	50.8939	202.222
ME2	235.1422	242.3965	359.892	363.335	289.6892	192.831	83.6005	252.412
差異比	16%	12%	30%	29%	24%	24%	64%	25%
ME3	230.4627	294.9152	344.8275	349.157	278.1655	175.033	66.9237	248.4977
差異比	13%	37%	25%	24%	19%	13%	31%	23%

表 4.1 為 10 月 17 日到 10 月 23 日格點平均之日累積雨量表。分別取半徑 500 公里內和 200 公里內。單位為 mm。

500 公里		ME1	ME2	ME2-ME1	ME3	ME3-ME1
總水含量時間變率		-0.0553	-0.0357	0.01955	-0.0526	0.00268
細 項	水氣變率	-0.0569	-0.0375	0.01943	-0.0538	0.00317
	降水粒子變率	0.0003	0.0004	0.00008	0.0002	-0.00016
	雲粒子變率	0.0013	0.0014	0.00004	0.0010	-0.00033
總水密度通量輻合率		1.8064	2.3956	0.58919	2.5241	0.71767
細 項	水氣密度輻合率	2.6894	3.4679	0.77852	3.4065	0.71709
	降水粒子密度輻合率	0.5048	0.7475	0.24275	0.6074	0.10265
	雲粒子密度輻合率	-0.1584	-0.2127	-0.05426	-0.1916	-0.03317
	水氣密度平流率	-0.8711	-1.0669	-0.19577	-0.8791	-0.00795
	降水粒子密度平流率	-0.5008	0.7475	1.24831	-0.6045	-0.10375
	雲粒子密度平流率	0.1426	0.2041	0.06157	0.1854	0.04280
蒸發率		0.4605	0.6156	0.15510	0.4839	0.02335
降水率		2.2699	2.7003	0.4304 (19%)	2.4515	0.1816 (8%)
誤差		-0.0523	-0.3466		-0.6091	

表 4.2 為梅姬颱風所有時間之(10 月 16 日 0600 UTC 到 10 月 24 日 0000 UTC)，FU1、FU2、FU3 之 500 公里半徑內水氣收支方程式各項，單位為 $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。

500 km	ME1	ME2	ME2-ME1	差異比	ME3	ME3-ME1	差異比
水氣密度	50.7407	59.2690	8.5284	17%	64.3045	13.5639	27%
風場輻合	4.6033	5.1925	0.5892	13%	4.9771	0.3738	8%

表 4.3 為半徑 500 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。

200 km	ME1	ME2	ME2-ME1	差異比	ME3	ME3-ME1	差異比
水氣密度	55.54371	66.62816	11.08445	20%	71.94088	16.39718	30%
風場輻合	17.49703	19.78911	2.292078	13%	19.20984	1.712811	10%

表 4.4 為半徑 200 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。



	400 km				
	2012/6/17	2012/6/18	2012/6/19	2012/6/20	4 天平均
TA1	62.556	61.143	58.914	58.15	60.191
TA2	67.152	69.961	67.395	61.629	66.534
差異比	7%	14%	14%	6%	11%
TA3	54.463	61.787	61.948	57.884	59.021
差異比	-12.94%	1.05%	5.15%	-0.46%	-1.94%
	200 km				
	2012/6/17	2012/6/18	2012/6/19	2012/6/20	4 天平均
TA1	93.468	131.0881	106.898	88.724	105.045
TA2	100.205	141.173	120.415	87.804	112.399
差異比	7%	8%	13%	-1%	7%
TA3	93.776	111.356	113.265	94.205	103.150
差異比	0.33%	-15.05%	5.96%	6.18%	-1.80%

表 5.1。為 6 月 17 日到 6 月 20 日格點平均之日累積雨量表。分別取半徑 400 公里內和 200 公里內。單位為 mm。

2012 泰利颱風		400 km 半徑				
		TA1	TA2	TA2-TA1	TA3	TA3-TA1
總水含量時間變率		-0.06	-0.0640	-0.0040	0.0112	0.0712
細 項	水氣變率	-0.0773	-0.0777	-0.0004	-0.0034	0.0739
	降水粒子變率	0.0111	0.0096	-0.0015	0.0107	-0.0004
	雲粒子變率	0.0062	0.0041	-0.0021	0.0039	-0.0023
總水密度通量輻合率		1.8867	2.2797	0.3929	2.3973	0.5106
細 項	水氣密度輻合率	2.7107	3.3128	0.6022	3.2466	0.5359
	降水粒子密度輻合率	0.4429	0.6788	0.2359	0.5591	0.1162
	雲粒子密度輻合率	-0.1562	-0.2151	-0.0588	-0.1865	-0.0303
	水氣密度平流率	-0.7868	-0.9936	-0.2068	-0.8194	-0.0326
	降水粒子密度平流率	-0.4511	-0.6901	-0.2390	-0.5699	-0.1188
	雲粒子密度平流率	0.1273	0.1869	0.0596	0.1675	0.0402
蒸發率		0.3278	0.4576	0.1298	0.3390	0.0120
降水率		2.499	2.8096	0.3106 (12%)	2.5405	0.0415 (2%)
誤差		0.2323	-0.0324		-0.2557	

表 5.2。為泰利颱風所有時間之(6 月 17 日 0000 UTC 到 6 月 21 日 0000 UTC)，TA1、TA2、TA3 之 400 公里半徑內水氣收支方程式各項，單位為 $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。

400 公里	TA1	TA2	TA2-TA1	TA3	TA3-TA1
水氣密度	57.9131	66.1290	8.2159(14%)	72.3061	14.3930(25%)
風場輻合	4.8249	4.9830	0.1581(3%)	4.6618	-0.1631(-3%)

表 5.3。為半徑 400 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。

200 公里	TA1	TA2	TA2-TA1	TA3	TA3-TA1
水氣密度	61.6021	70.7942	9.1921(15%)	77.7341	16.1317(26%)
風場輻合	8.8286	9.0912	0.2626(3%)	8.3735	-0.4551(-5%)

表 5.4。為半徑 200 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。



	500 km				
	2013/8/26	2013/8/27	2013/8/28	2013/8/29	4 天平均
K01	34.576	35.281	26.377	14.470	21.082
K02	37.741	40.263	30.440	24.198	33.161
差異比	9%	14%	15%	67%	57%
K03	30.640	37.483	22.943	9.096	19.305
差異比	-11%	6%	-13%	-37%	-8%
	200 km				
	2013/8/26	2013/8/27	2013/8/28	2013/8/29	4 天平均
K01	103.543	85.308	86.524	24.857	53.427
K02	95.788	95.192	107.369	94.472	98.205
差異比	7%	12%	24%	280%	84%
K03	90.411	89.259	99.123	21.425	50.274
差異比	-13%	5%	15%	-14%	-6%

表 6.1 為 8 月 26 日到 8 月 29 日格點平均之日累積雨量表。分別取半徑 500 公里內和 200 公里內。單位為 mm。

2013 康芮颱風		500 km 半徑				
		KO1	KO2	KO2-KO1	KO3	KO3-KO1
總水含量時間變率		0.0256	0.0451	0.0195	0.0547	0.0290
細 項	水氣變率	0.0211	0.0384	0.0173	0.0520	0.0309
	降水粒子變率	0.0025	0.0043	0.0019	0.0020	-0.0004
	雲粒子變率	0.0021	0.0024	0.0003	0.0007	-0.0014
總水密度通量幅合率		0.7523	1.0090	0.2567	0.8525	0.1002
細 項	水氣密度幅合率	1.1909	1.6730	0.4821	1.3616	0.1708
	降水粒子密度幅合率	0.2437	0.4066	0.1629	0.2855	0.0418
	雲粒子密度幅合率	-0.0827	-0.1242	-0.0415	-0.0943	-0.0116
	水氣密度平流率	-0.4323	-0.6570	-0.2247	-0.5044	-0.0722
	降水粒子密度平流率	-0.2375	-0.4033	-0.1659	-0.2817	-0.0442
	雲粒子密度平流率	0.0701	0.1139	0.0437	0.0858	0.0157
蒸發率		0.2700	0.3920	0.1220	0.3064	0.0364
降水率		1.1532	1.3920	0.2388 (21%)	1.0434	-0.1098 (-8%)
誤差		0.1564	0.0360		-0.0734	

表 6.2。為康芮颱風之 8 月 26 日 0000 UTC 到 8 月 30 日 0000 UTC，KO1、KO2、KO3 之 500 公里半徑內水氣收支方程式各項，單位皆為 $\text{kgm}^2\text{h}^{-1}$ 。

500 公里	KO1	KO2	KO2-KO1	KO3	KO3-KO1
水氣密度	55.4841	63.1653	7.6812(14%)	68.9719	13.4878(24%)
風場輻合	2.2010	2.5796	0.3786(17%)	1.9279	-0.2731 (-12%)

表 6.3。為半徑 500 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。

300 公里	KO1	KO2	KO2-KO1	KO3	KO3-KO1
水氣密度	57.6049	66.0271	8.4223(15%)	71.9937	14.3888(25%)
風場輻合	4.4884	5.7819	1.2934(29%)	4.1411	-0.3474(-8%)

表 6.4。為半徑 300 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。

200 公里	KO1	KO2	KO2-KO1	KO3	KO3-KO1
水氣密度	58.9980	67.6069	8.6089(14%)	74.2375	6.5685(11%)
風場輻合	6.7729	8.2777	1.5048(22%)	6.3521	-0.4208(-6%)

表 6.5。為半徑 200 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kgm^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。

	400 km						
	2014/9/18	2014/9/19	2014/9/20	2014/9/21	2014/9/22	2014/9/23	6 天平均
FU1	80.687	85.621	69.273	57.410	37.509	15.654	57.692
FU2	88.573	100.474	73.242	60.116	39.929	21.113	63.908
差異比	10%	17%	6%	5%	6%	35%	11%
FU3	78.225	89.984	70.244	69.105	39.476	18.231	60.877
差異比	-3%	5%	1%	20%	5%	16%	6%
	200 km						
FU1	100.672	136.277	157.962	85.904	51.239	29.359	93.569
FU2	100.211	157.732	179.747	101.91	54.679	31.796	109.146
差異比	0%	16%	14%	19%	7%	8%	17%
FU3	100.211	147.492	158.147	88.351	60.847	17.259	95.385
差異比	0%	8%	0%	3%	19%	-41%	2%

表 7.1。為 9 月 18 日到 9 月 23 日格點平均之日累積雨量表。分別取半徑 400 公里內和 200 公里內。單位為 mm

鳳凰颱風		400 km 半徑				
		FU1	FU2	FU2-FU1	FU3	FU3-FU1
總水含量時間變率		-0.0579	-0.0214	0.0365	-0.0405	0.0174
細項	水氣變率	-0.0609	-0.0253	0.0356	-0.0439	0.0170
	降水粒子變率	0.0008	0.0018	0.0010	0.0012	0.0004
	雲粒子變率	0.0022	0.0021	-0.0001	0.0022	0.0000
總水密度通量輻合率		1.9227	2.3758	0.4531	2.4608	0.5381
細項	水氣密度輻合率	2.6119	3.2598	0.6479	3.2660	0.6541
	降水粒子密度輻合率	0.3925	0.6266	0.2341	0.5614	0.1690
	雲粒子密度輻合率	-0.1597	-0.2178	-0.0581	-0.2000	-0.0403
	水氣密度平流率	-0.6664	-0.8642	-0.1978	-0.7848	-0.1184
	降水粒子密度平流率	-0.3863	-0.6230	-0.2367	-0.5601	-0.1739
	雲粒子密度平流率	0.1307	0.1944	0.0637	0.1784	0.0477
蒸發率		0.3014	0.4236	0.1222	0.3288	0.0274
降水率		2.4038	2.6628	0.2590(10%)	2.5366	0.1327(5.5%)
誤差		0.1219	-0.1579		-0.2935	

表 7.2 為鳳凰颱風之 9 月 18 日 0000 UTC 到 9 月 24 日 0000 UTC，FU1、FU2、FU3 之 400 公里半徑內水氣收支方程式各項，單位皆為 $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。

400 公里	FU1	FU2	FU2-FU1	FU3	FU3-FU1
水氣密度	52.5467	62.8144	10.2677(19.5%)	68.2710	15.7243(30%)
風場輻合	4.2799	4.8177	0.5378(12.6%)	4.6499	0.3699(8.6%)

表 7.3。為半徑 400 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。

200 公里	FU1	FU2	FU2-FU1	FU3	FU3-FU1
水氣密度	56.87173	66.61556	9.7438(17%)	72.57802	15.7062(28%)
風場輻合	7.7045	8.8031	1.0986(14%)	7.5221	-0.1824(-2%)

表 7.4。為半徑 200 公里從海平面垂直積分至 500 hPa 的水氣密度和風場輻合。水氣密度單位為 kg/m^2 ，風場輻合單位為 10^{-2}m^{-1} 。

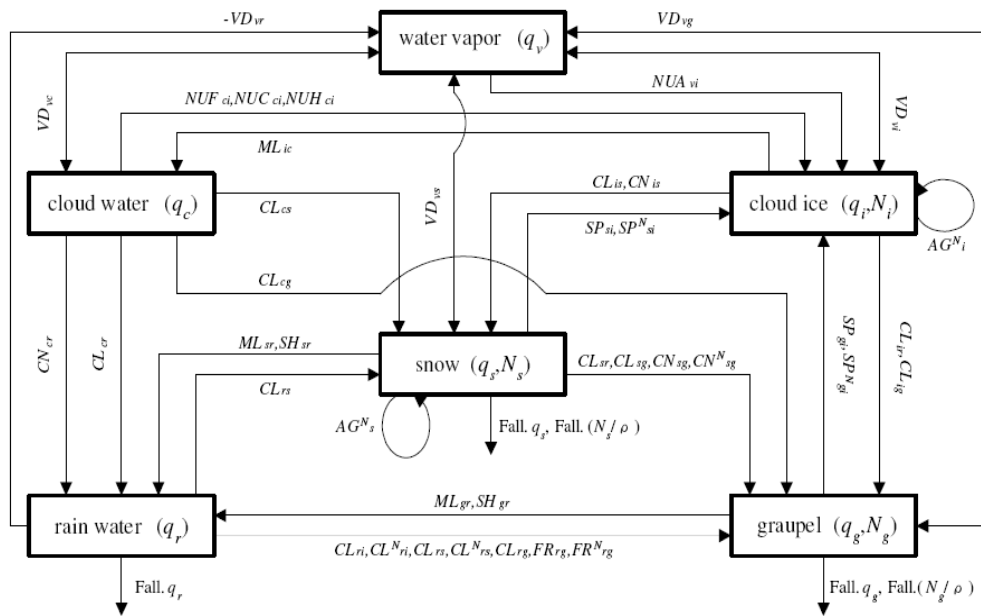


圖 2.1 為 CReSS 的模式發展的雲微物理現象相關轉換過程示意圖。



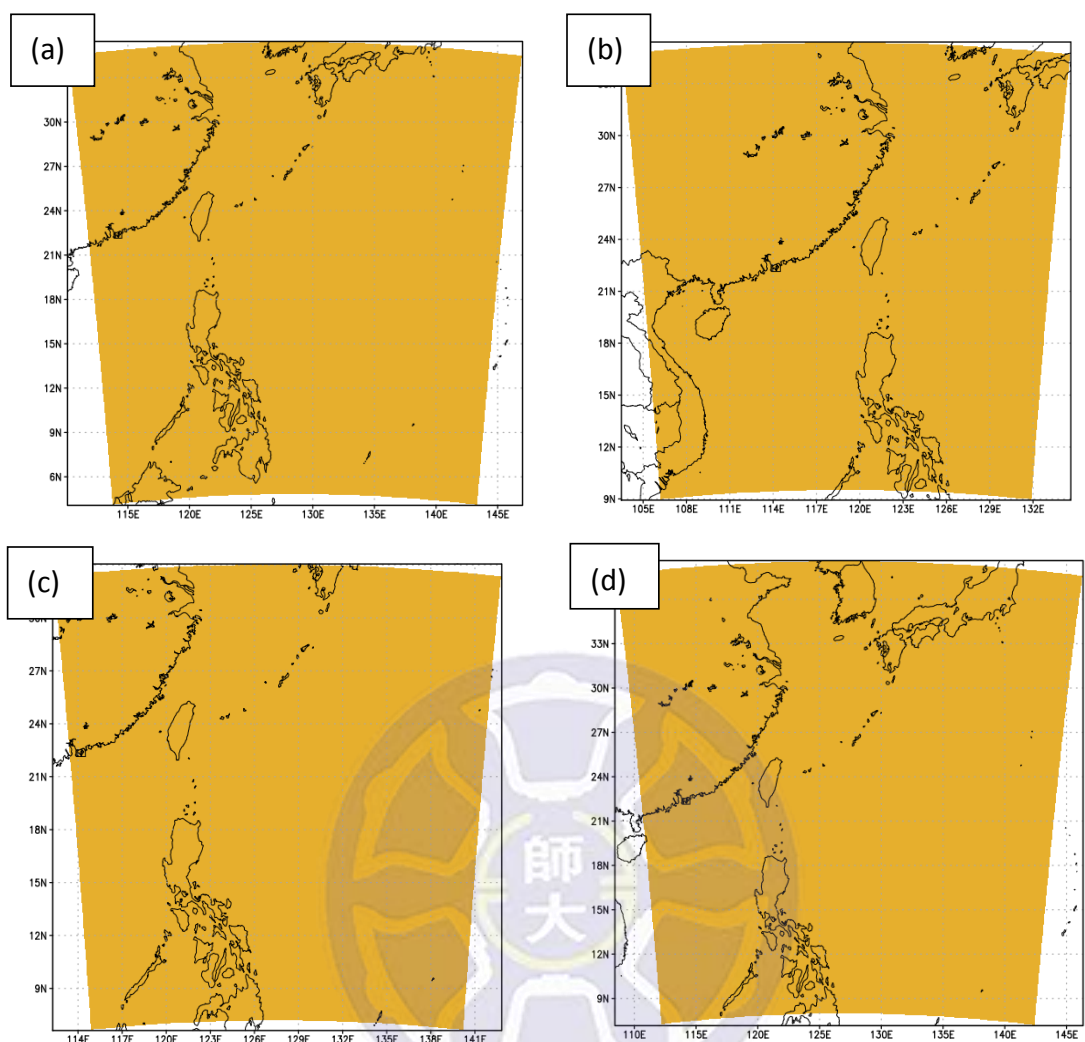


圖 2.2。模擬範圍圖(a)2010 年梅姬颱風(b)2012 年泰利颱風(c)2013 年康芮颱風(d)2014 年鳳凰颱風。

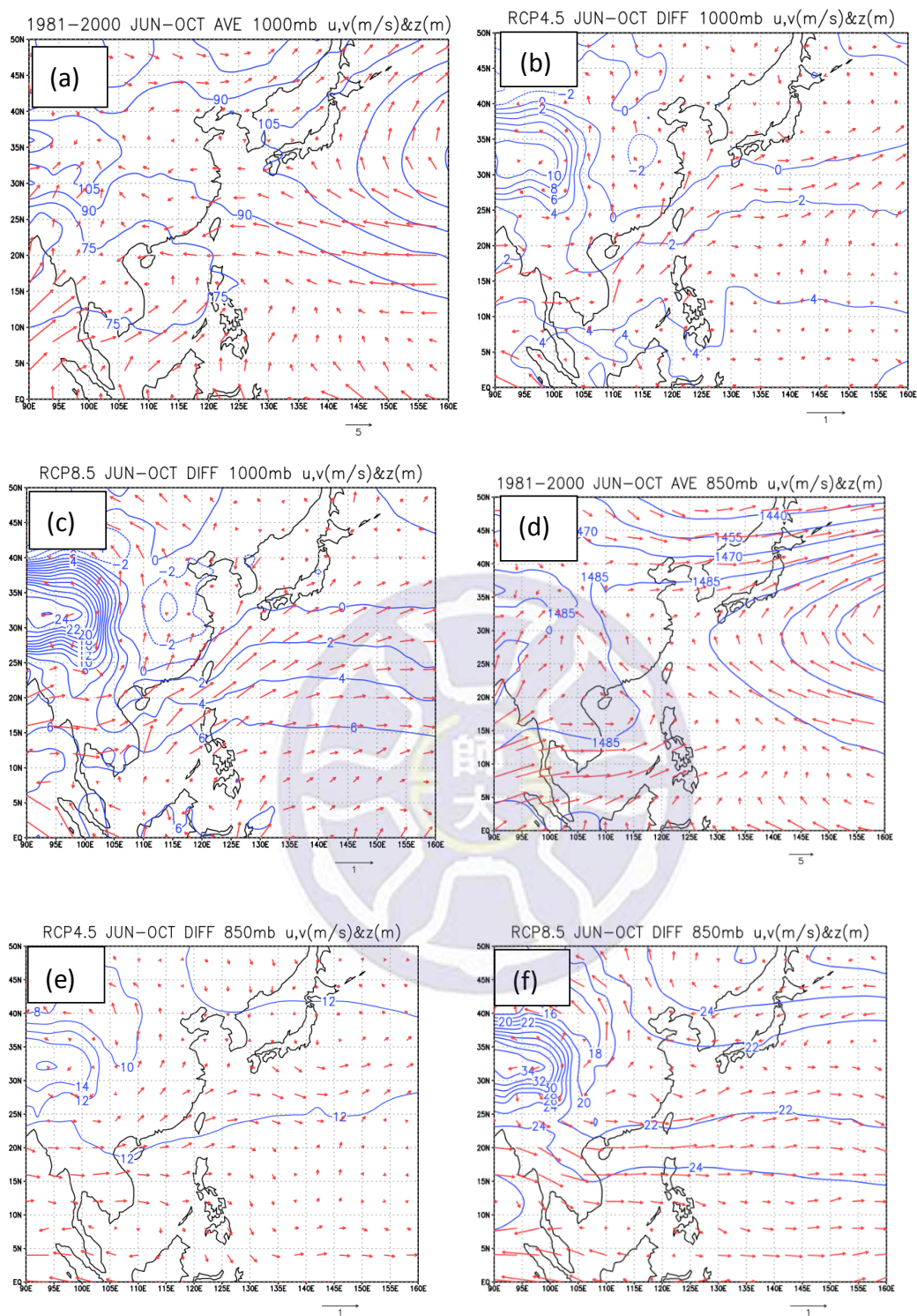


圖 3.1 續。(a)、(d)、(g)、(j)為 1981-2000 年 6 月到 10 月的平均場。(b)、(e)、(h)、(k)為 2081-2100 年 6 月到 10 月的平均場減去 1981-2000 年平均場的 RCP4.5 差異場。(c)、(f)、(i)、(l)為同 RCP4.5 方式獲得的 RCP8.5 的差異場。其高度為 1000、850、700、500 hPa。曲線為重力位高度(m)，箭頭為風速(ms^{-1})。

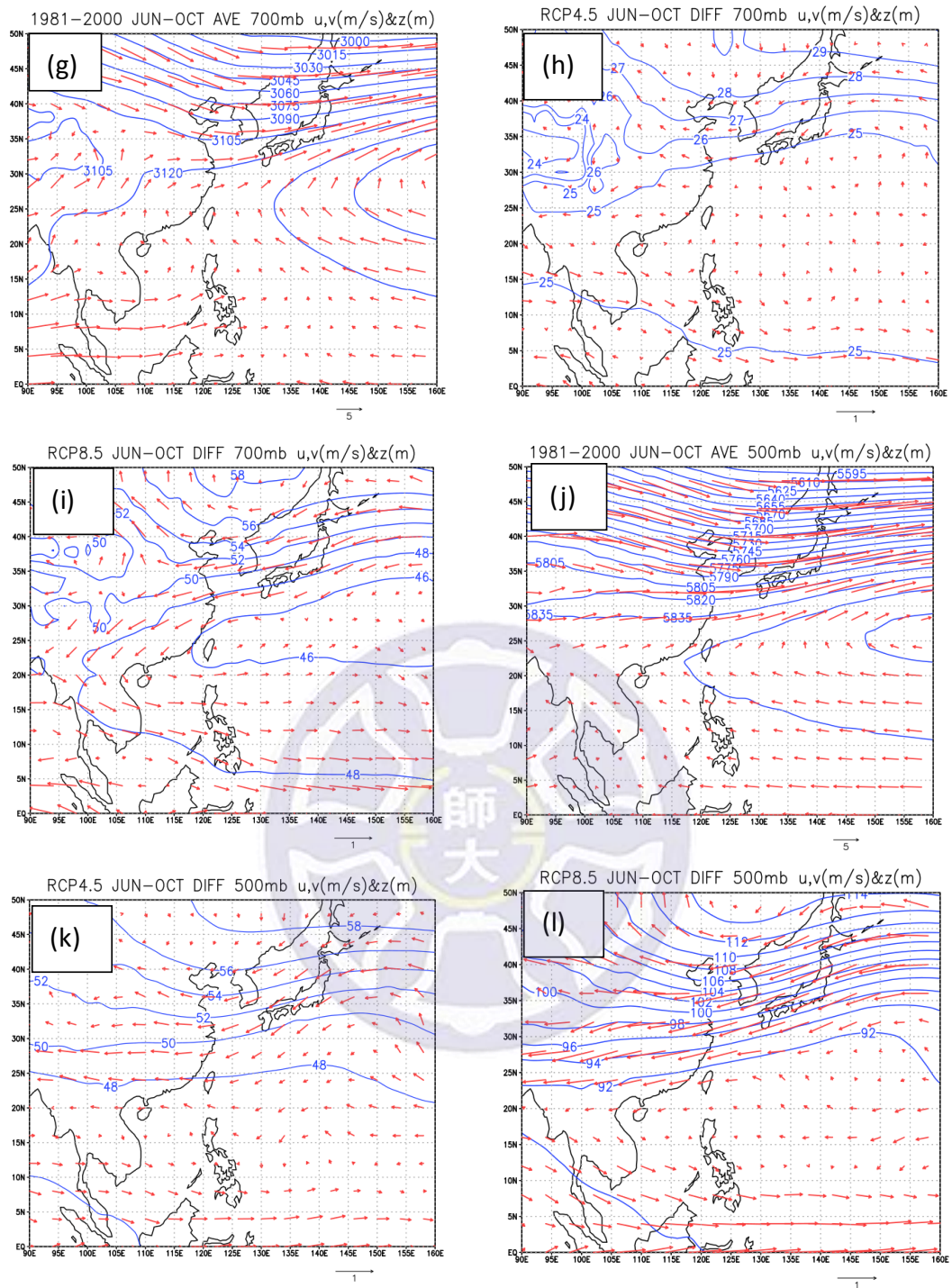


圖 3.1。

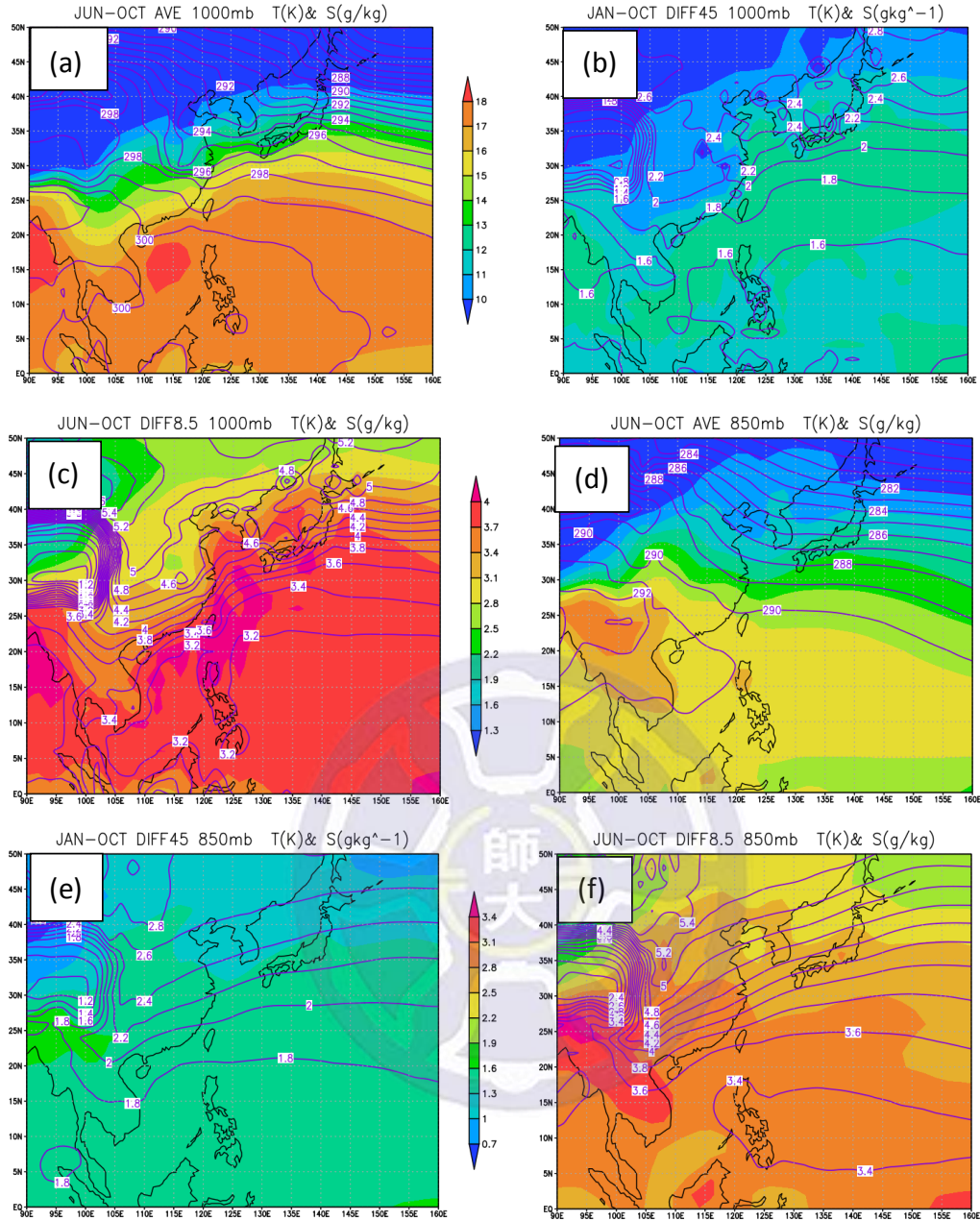


圖 3.2 待續。(a)、(d)、(g)、(j)為 1981-2000 年 6 月到 10 月的平均場。(b)、(e)、(h)、(k)為 2081-2100 年 6 月到 10 月的平均場減去 1981-2000 年平均場的 RCP4.5 差異場。(c)、(f)、(i)、(l)為同 RCP4.5 方式獲得的 RCP8.5 的差異場。其高度為 1000、850、700、500 hPa。等值線為溫度(K)，色階為比濕(gkg⁻¹)。

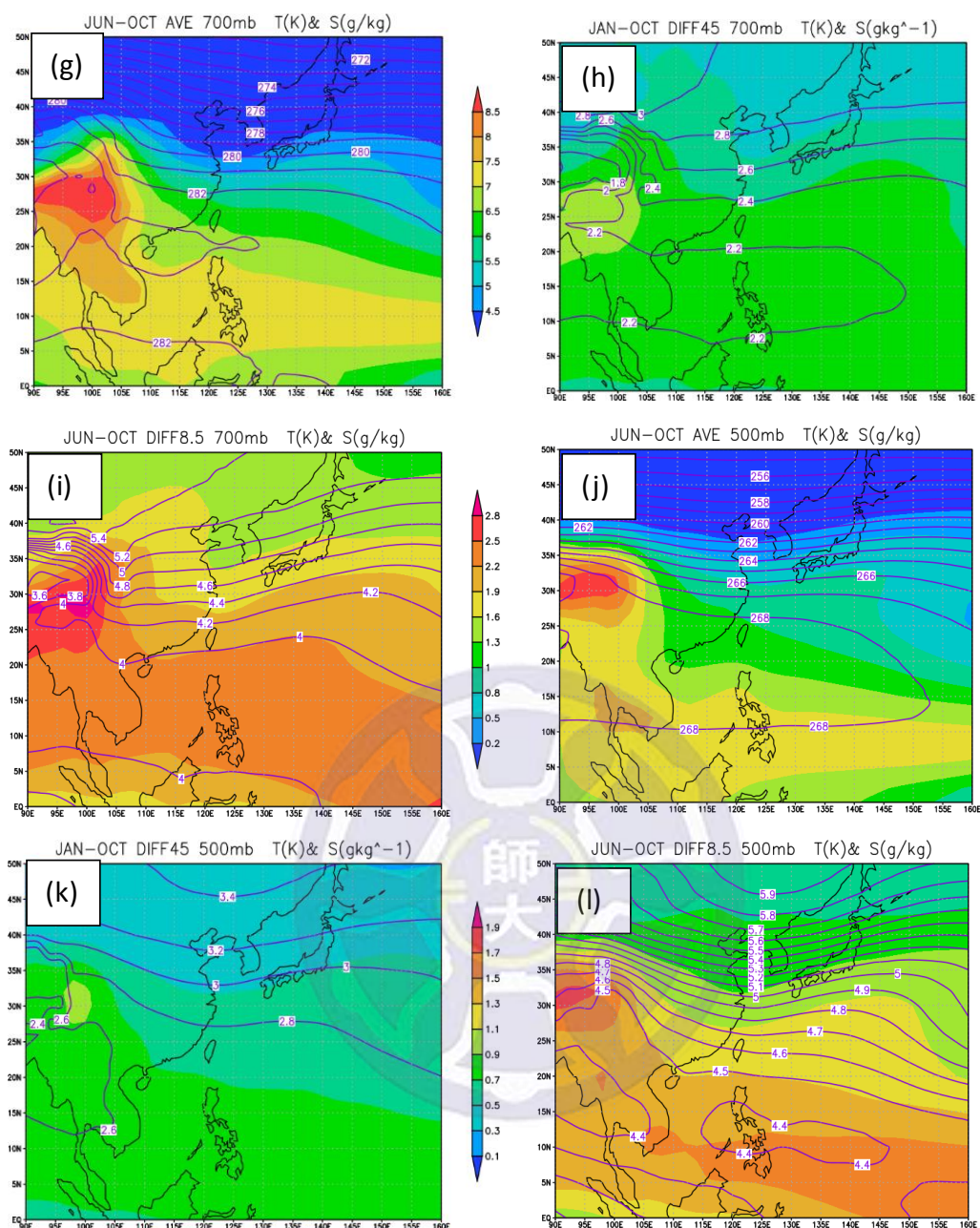


圖 3.2，完。

201013 梅姬(MEGI)

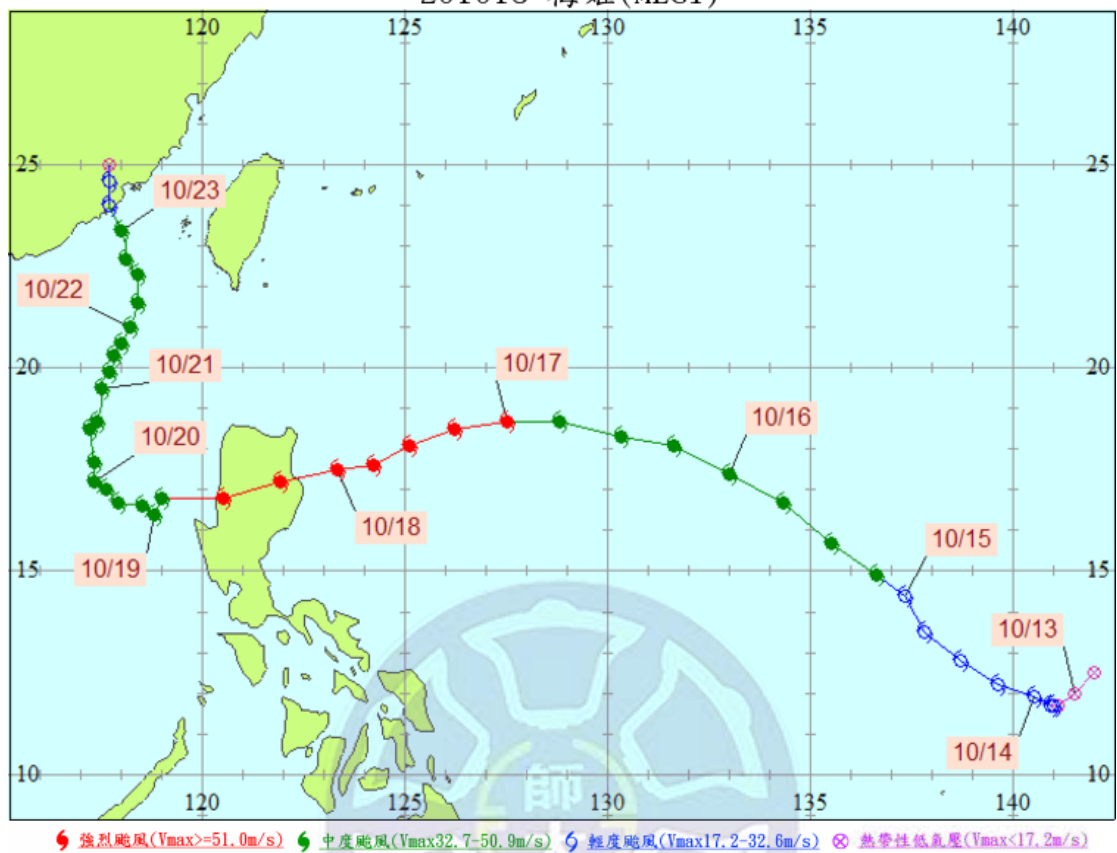


圖 3.3。中央氣象局的梅姬颱風的路徑圖，時間為 UTC 制，每 6 小時一筆。不同顏色代表不同強度，如圖例所示。

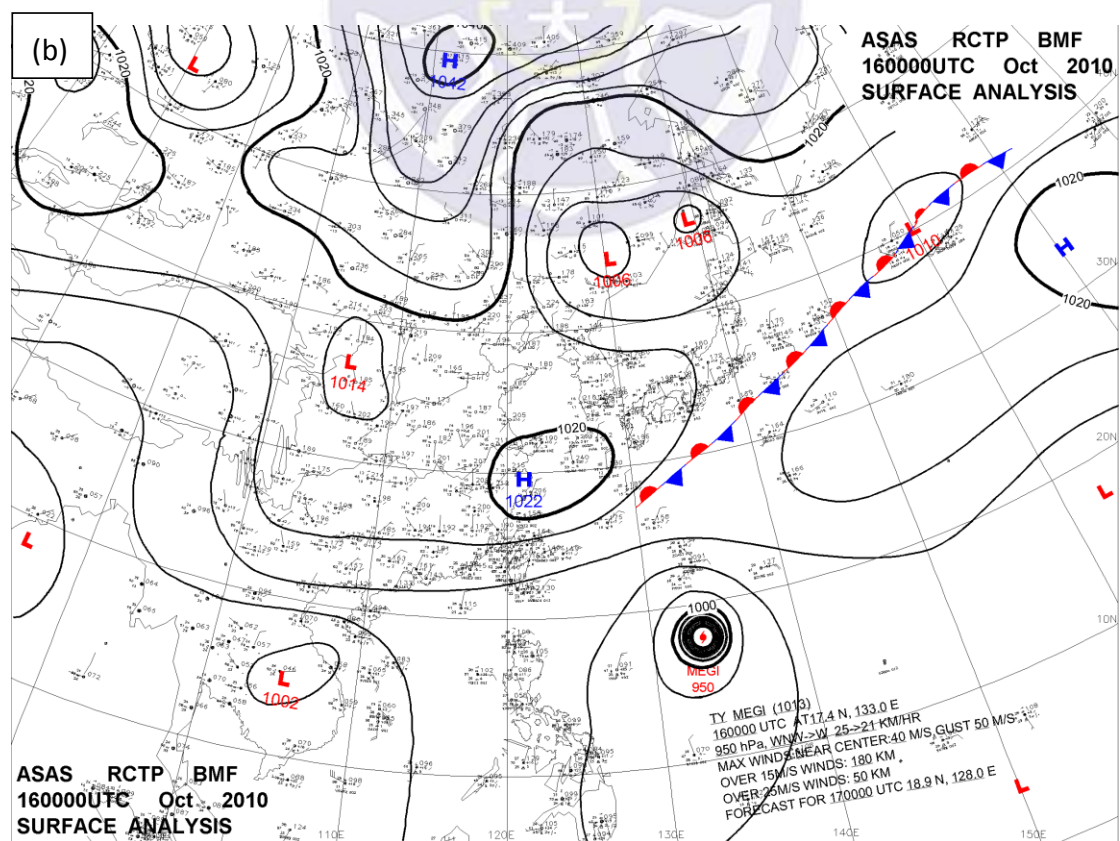
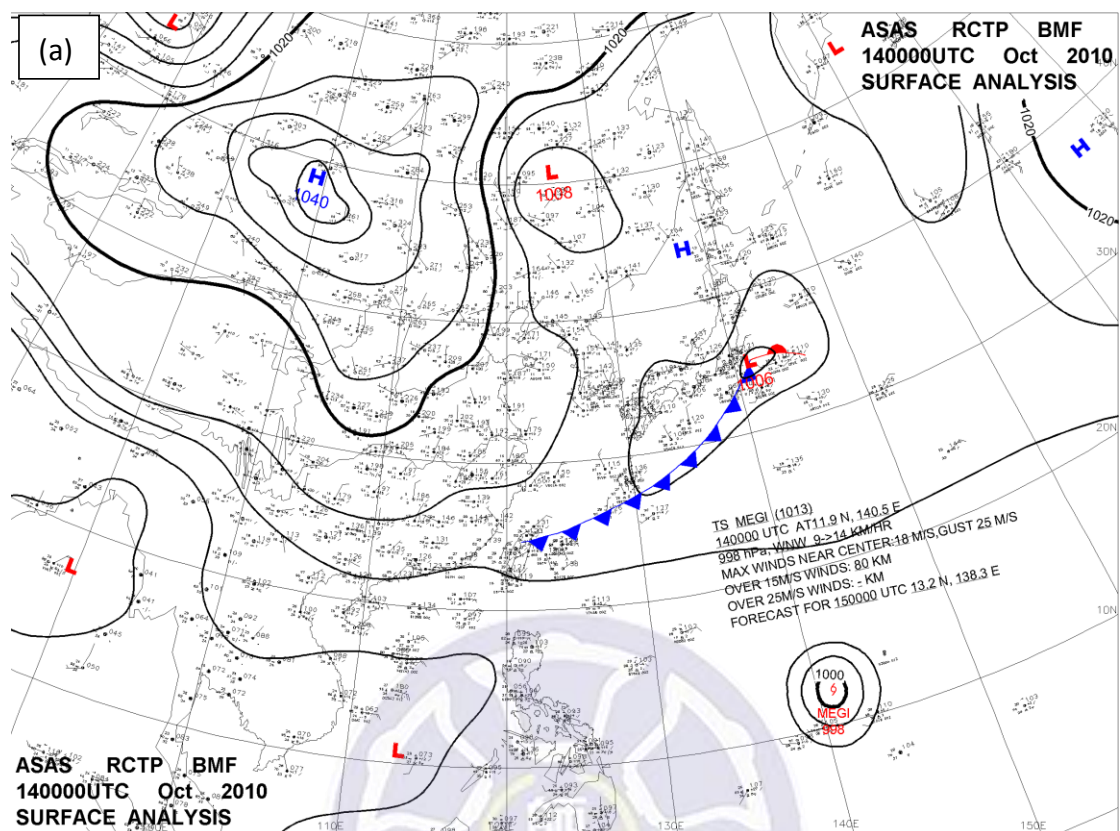


圖 3.4 待續。中央氣象局之在 2010 年 10 月 13 到 24 日的地面天氣圖。實線為等壓線，間距為

2 hPa °

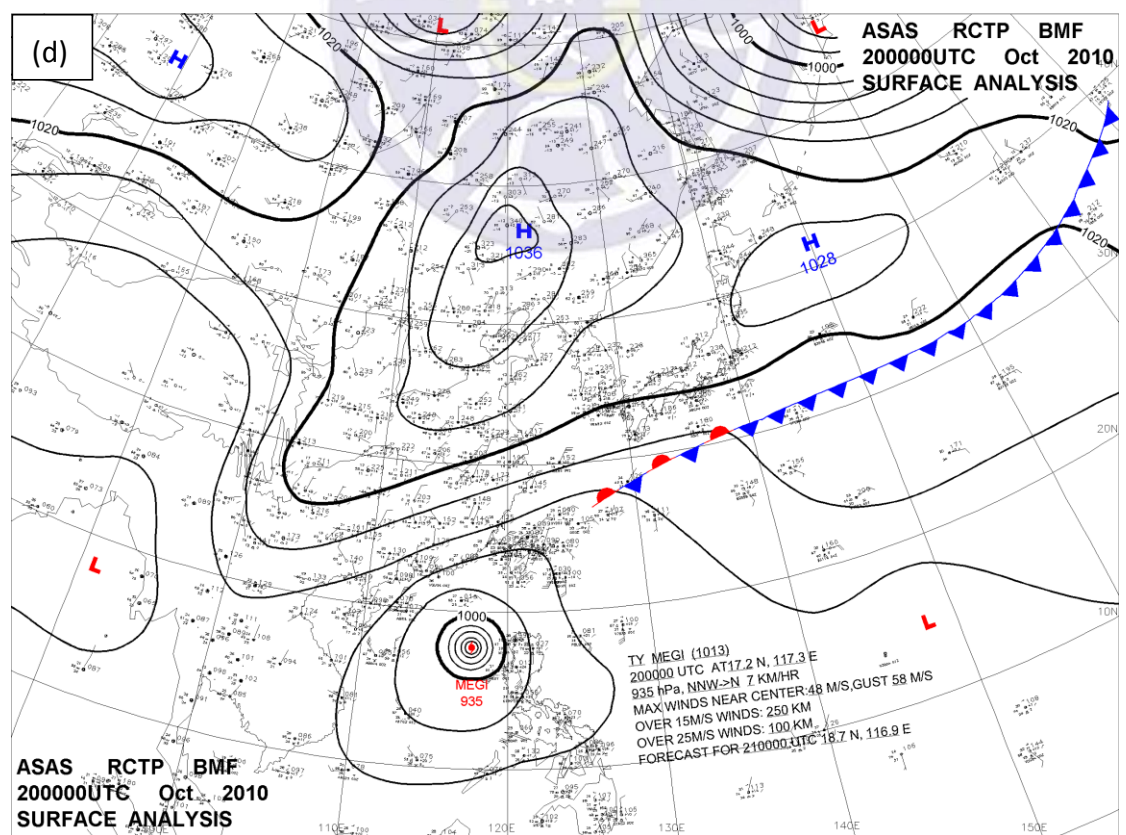
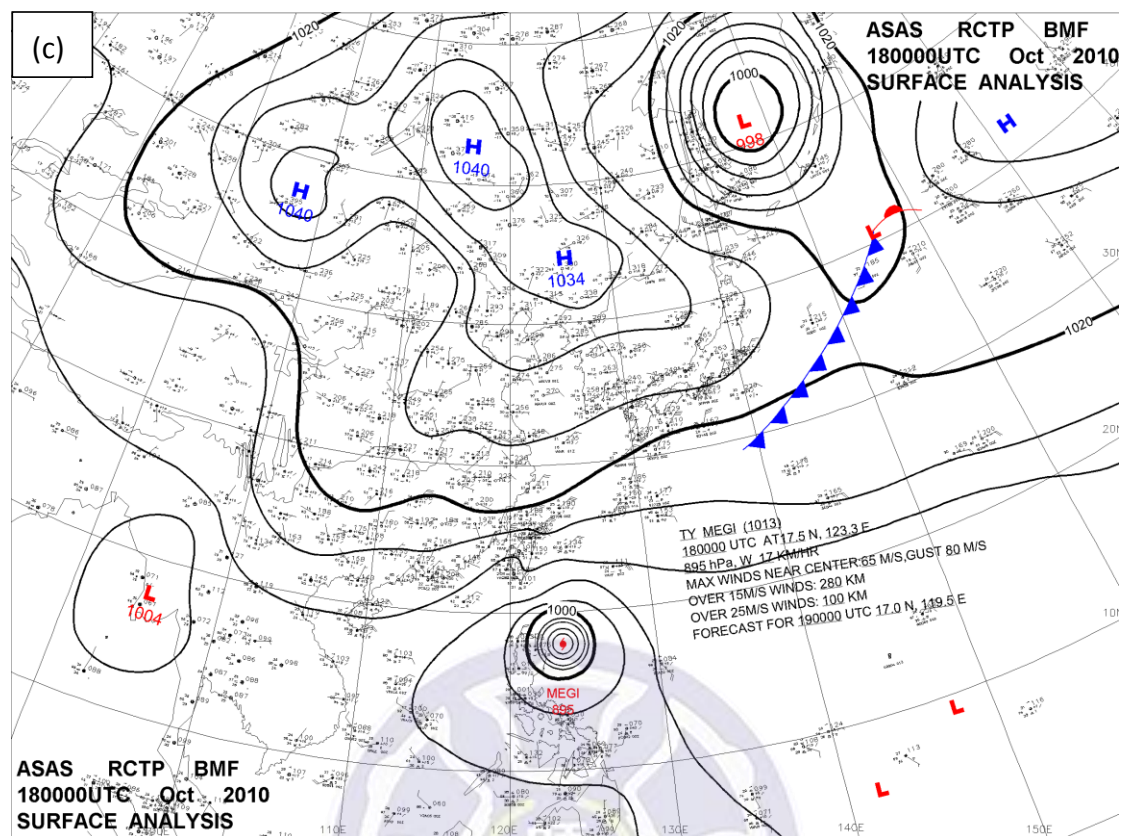


圖 3.4 待續

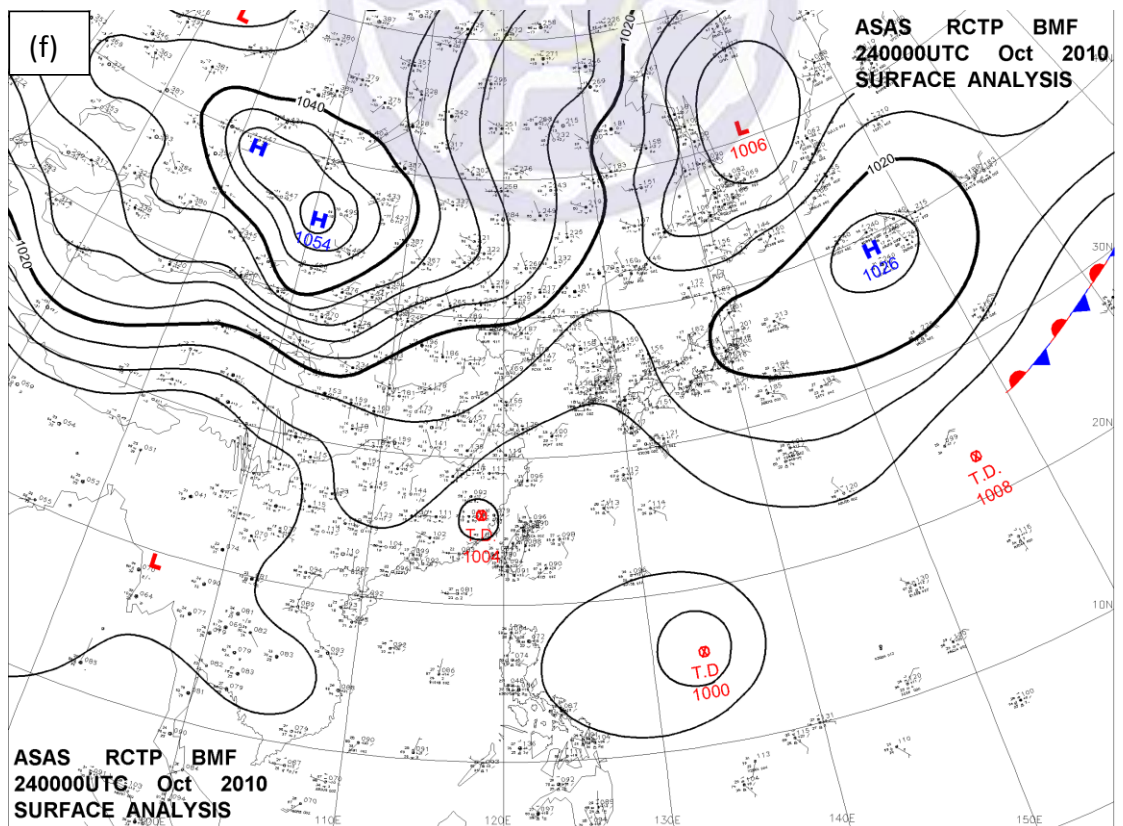
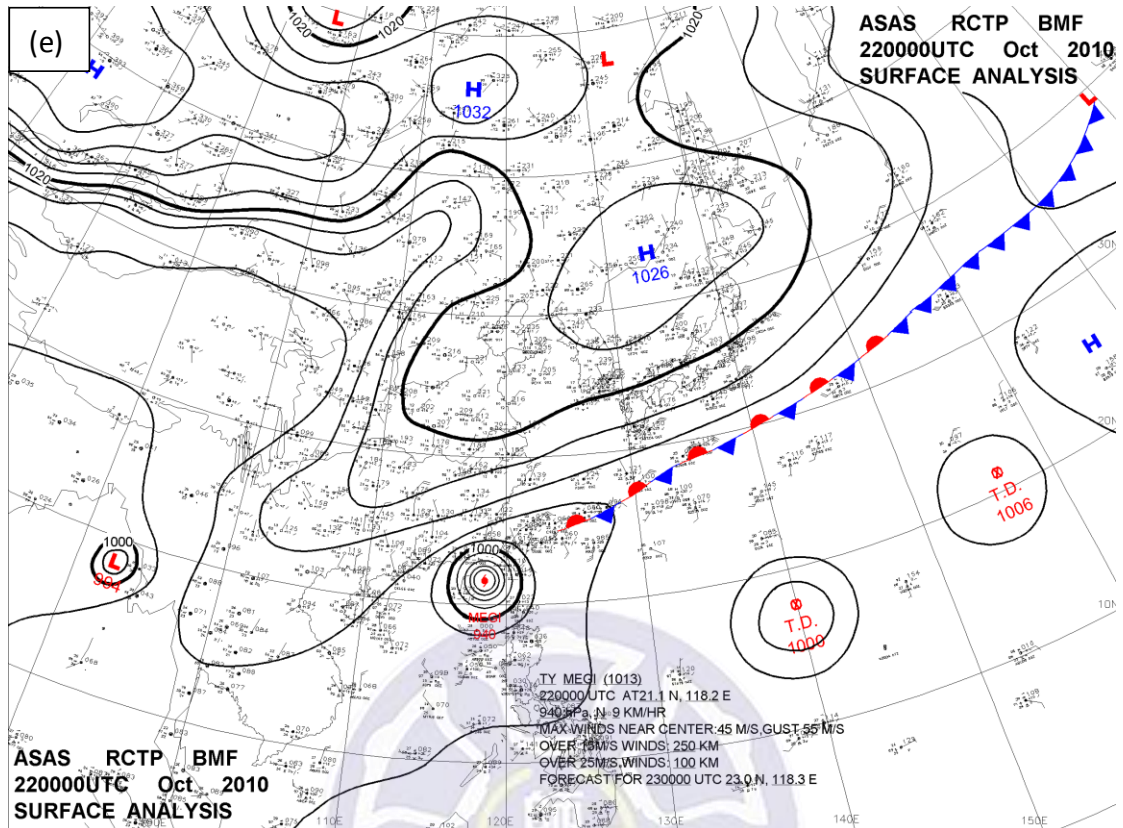


圖 3.4，完。

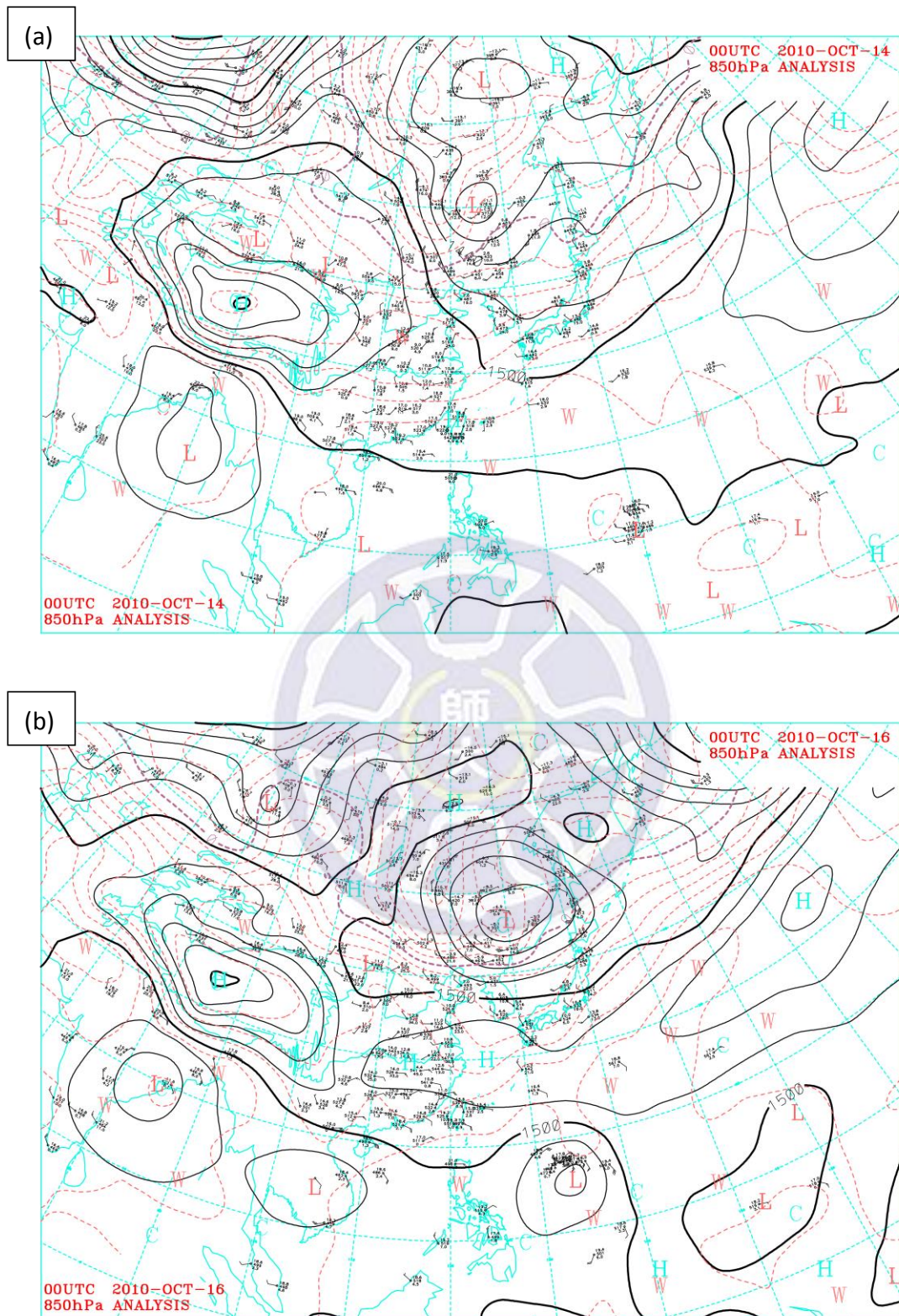


圖 3.5 待續。中央氣象局在 2010 年 10 月 14 日到 24 日之 850 hPa 的天氣圖。實線為等高線，間隔為 50 gpm。

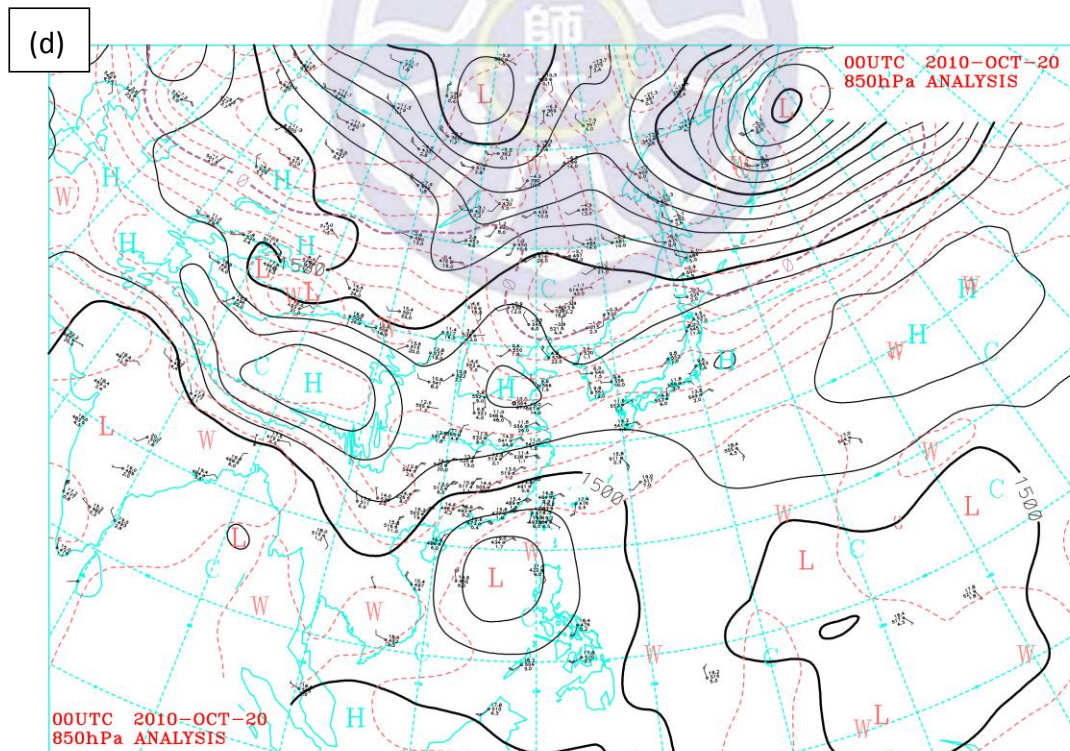
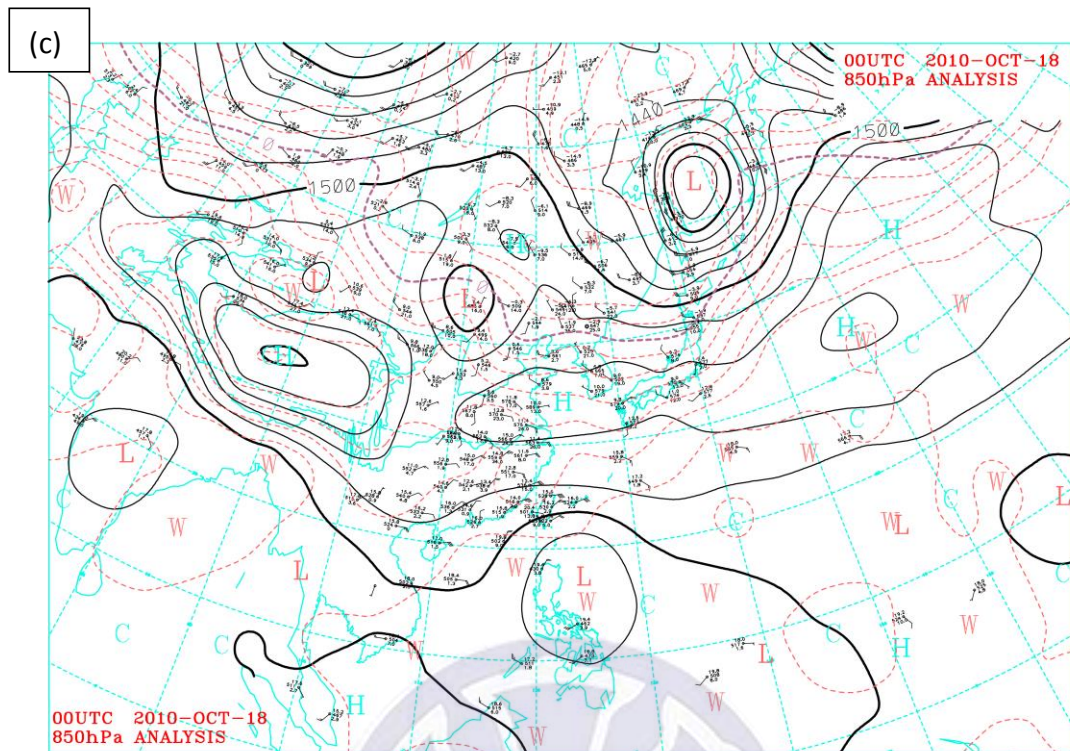


圖 3.5 待續

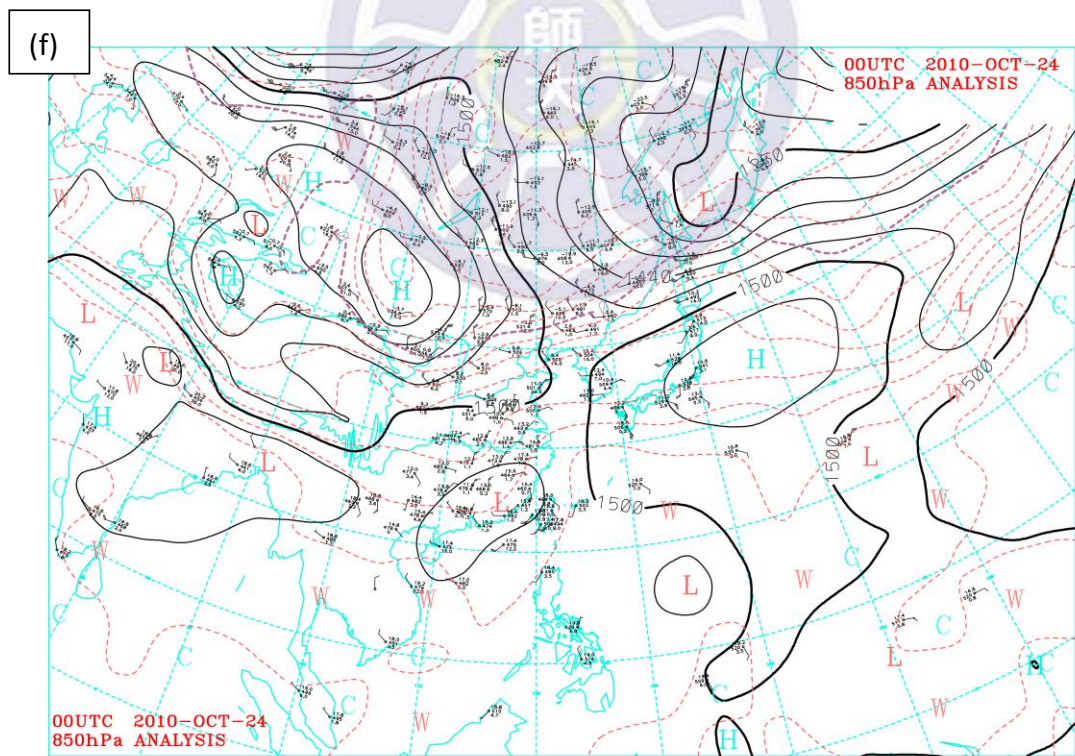
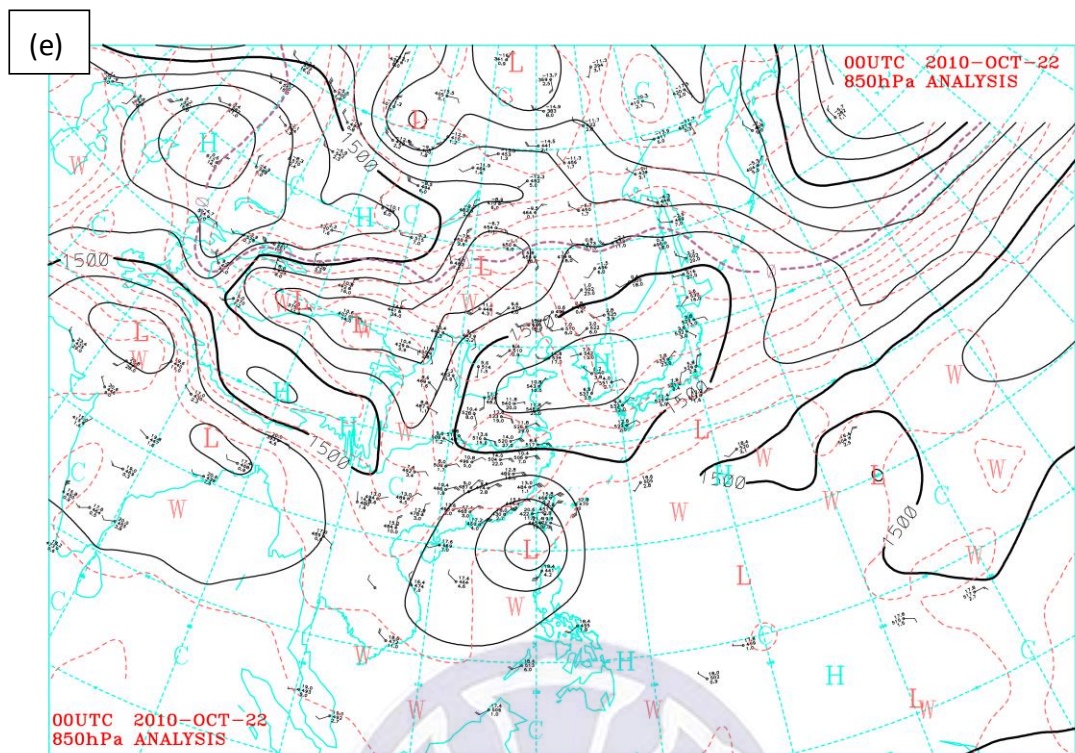


圖 3.5 待續

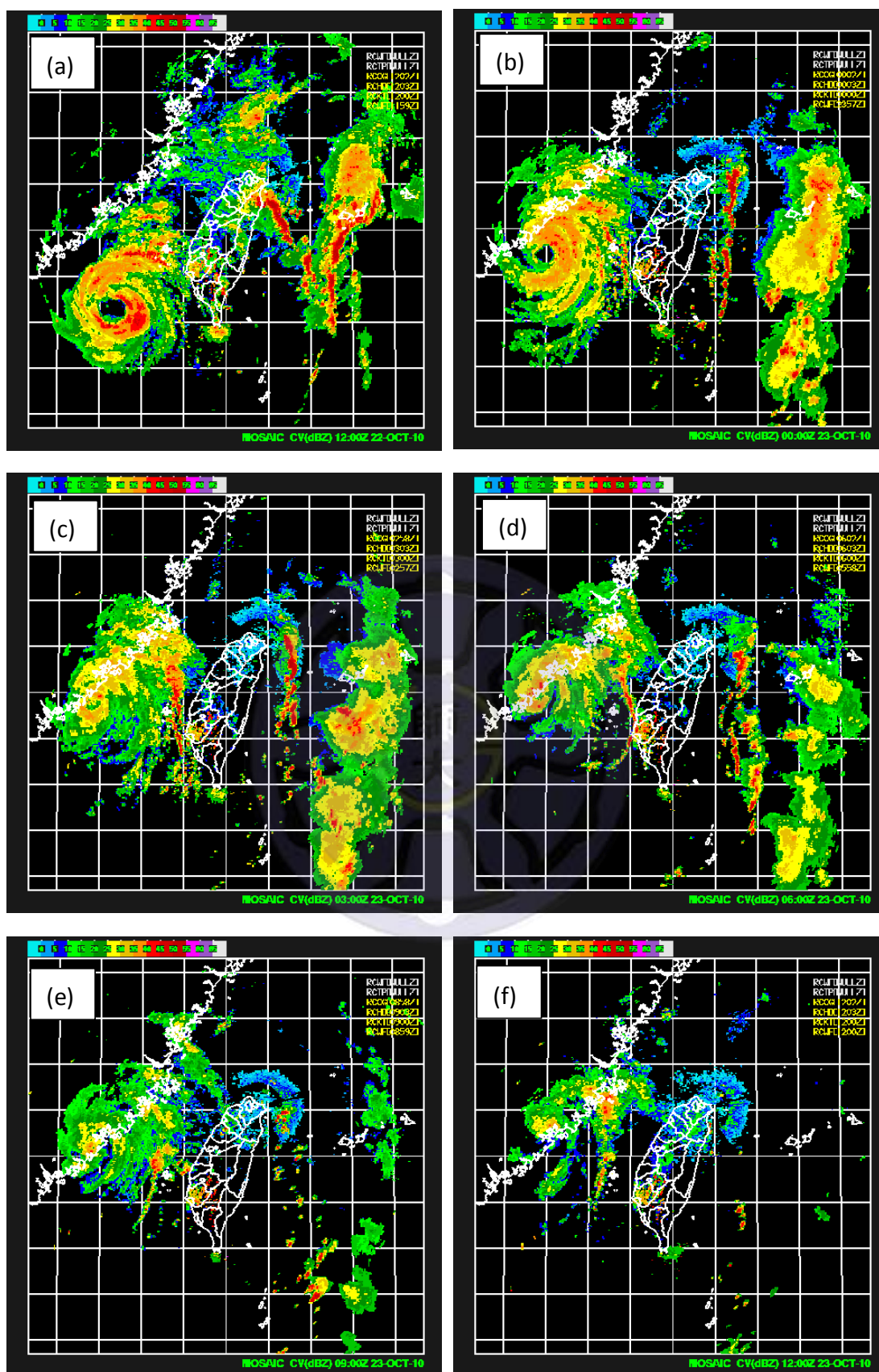


圖 3.6 中央氣象局雷達圖，為梅姬颱風靠近的台灣時間，從圖(a)10 月 22 日 1200 UTC，
(b)(c)(d)(e)(f)為10 月 23 日 0000 UTC 到 10 月 23 日 1200 UTC，每 3 小時一筆。

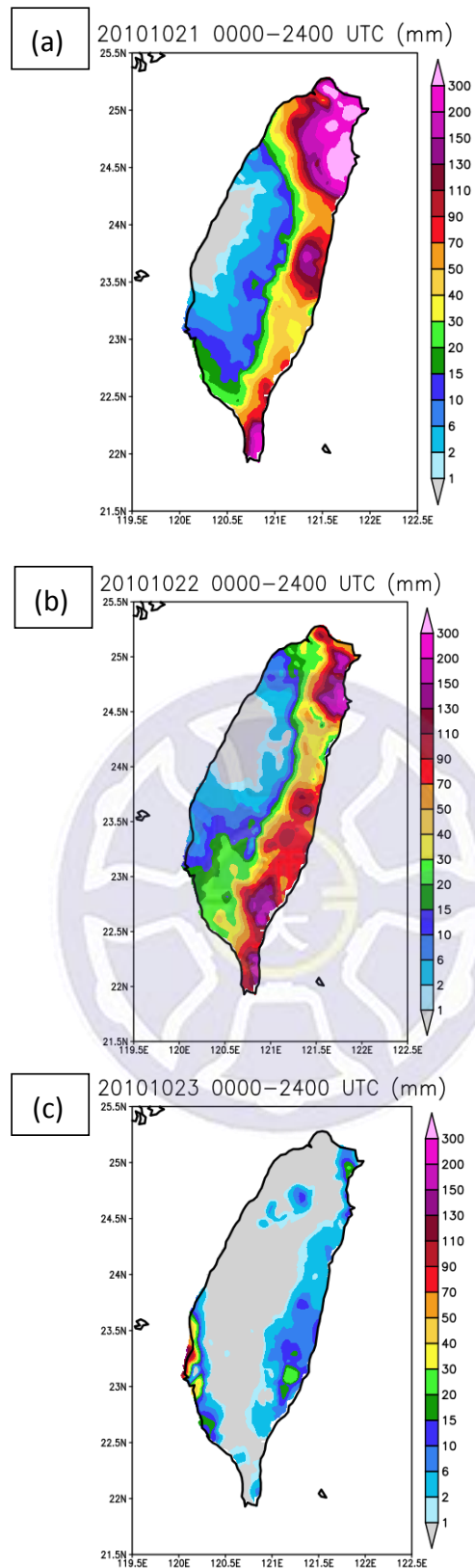


圖 3.7。梅姬颱風 2010 年 10 月 21 日到 23 日的台灣地區日累積降雨圖，單位為(mm)。

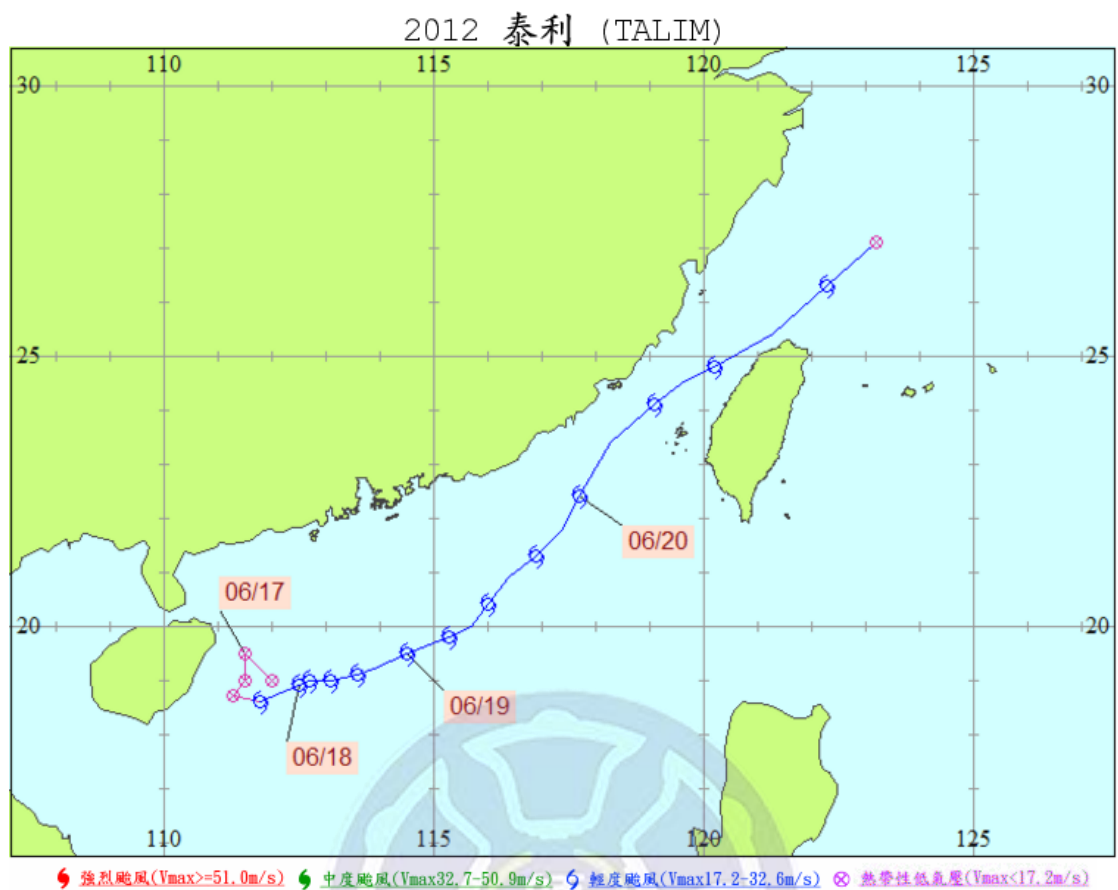


圖 3.8。中央氣象局的泰利颱風的路徑圖，時間為 UTC 制，每 6 小時一筆。不同顏色代表不同強度，如圖例所示。

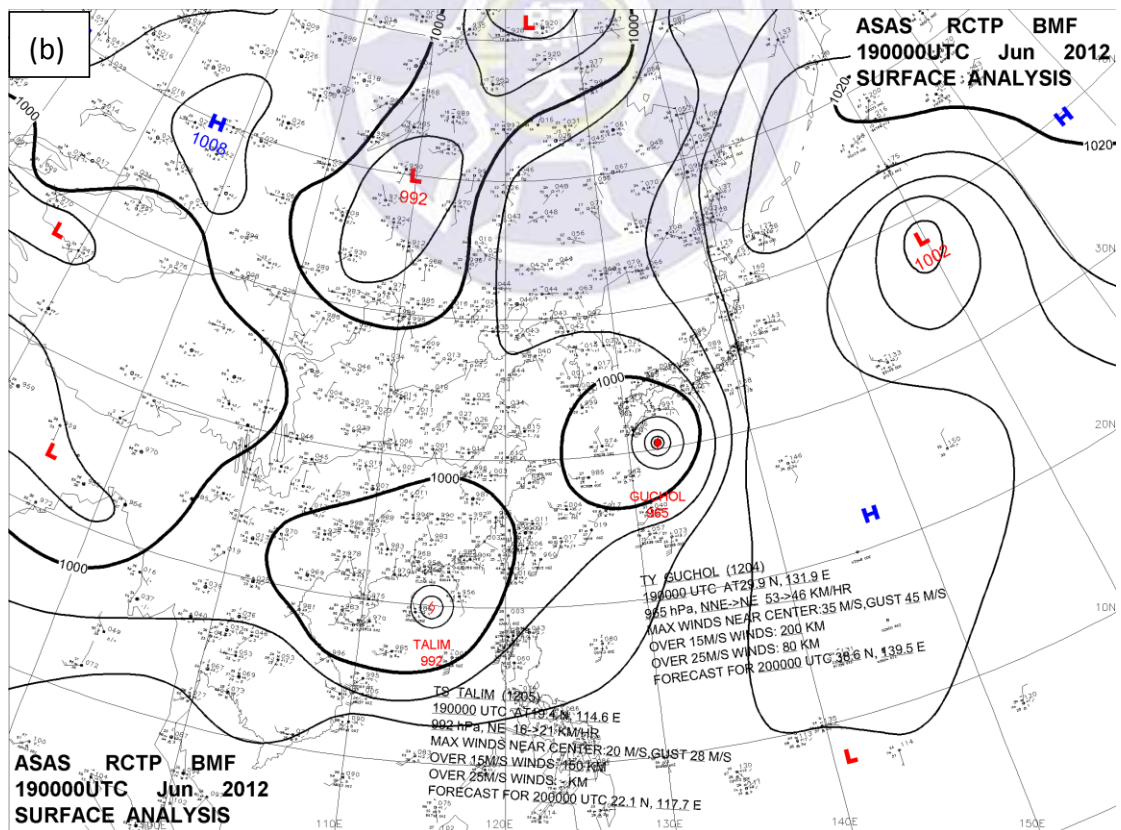
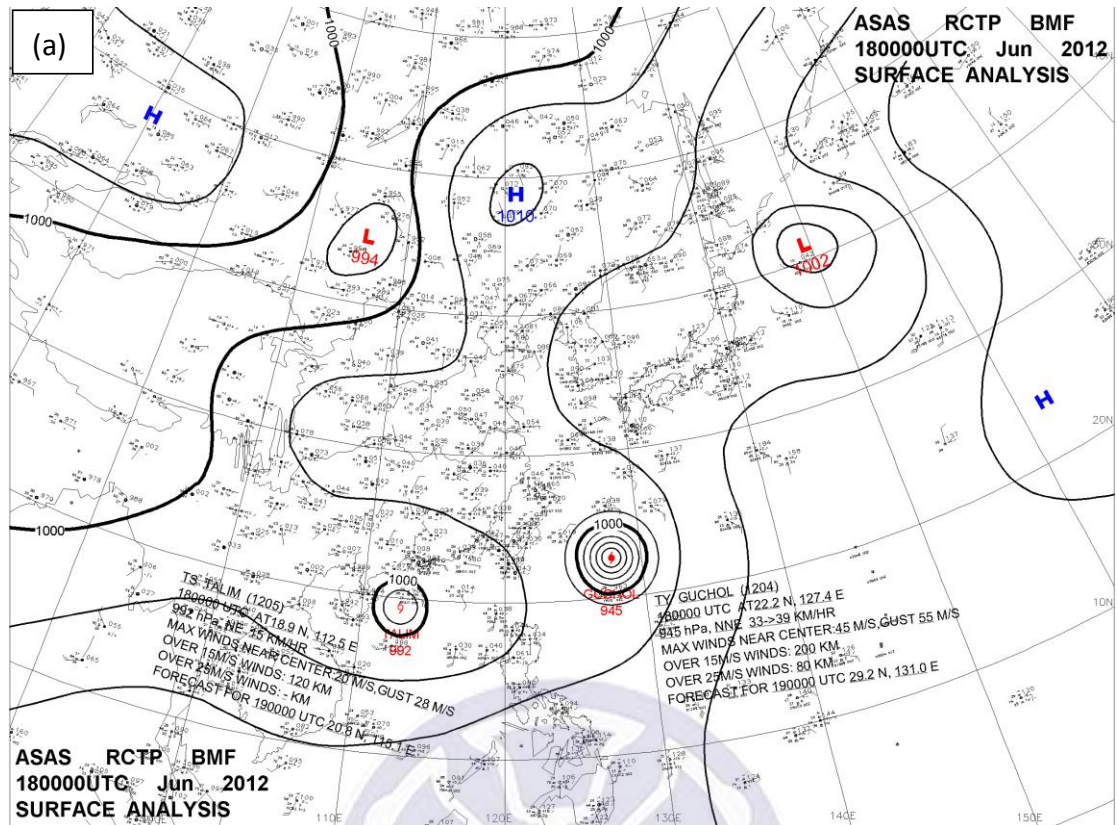


圖 3.9 待續。中央氣象局之在 2012 年 6 月 18 到 21 日的地面天氣圖。實線為等壓線，間距為 2 hPa。

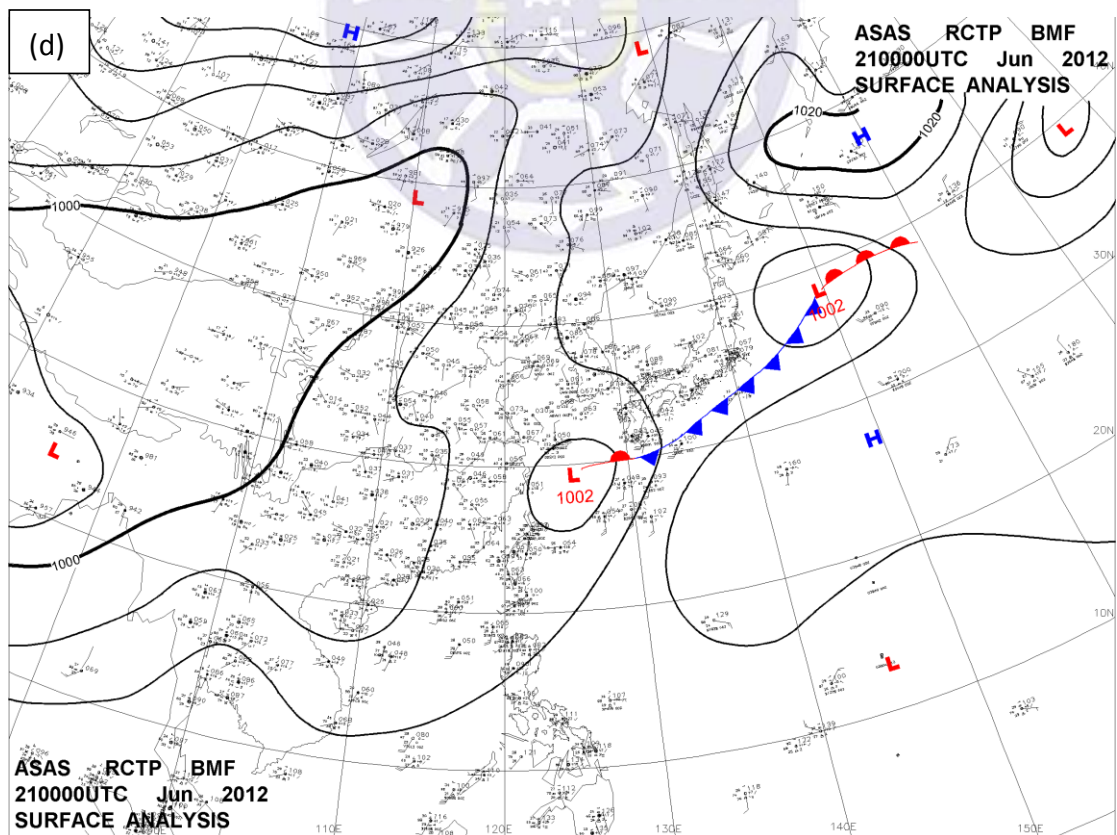
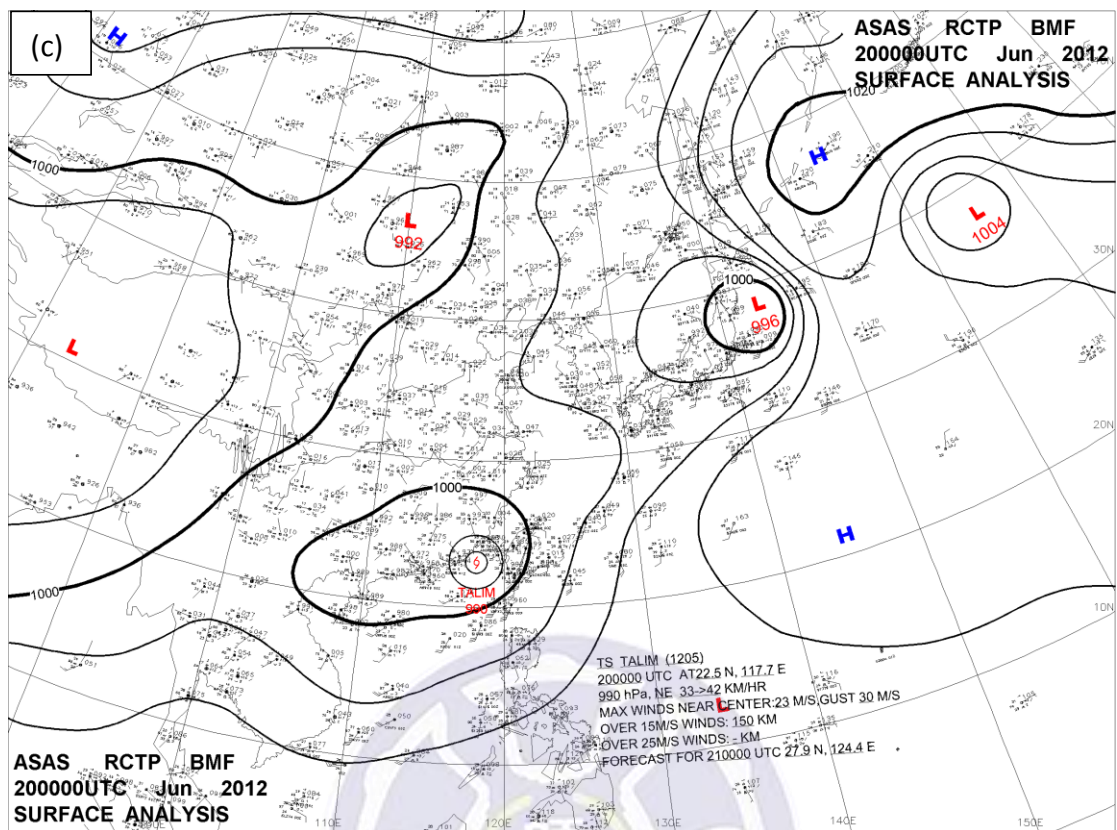


圖 3.9，完。

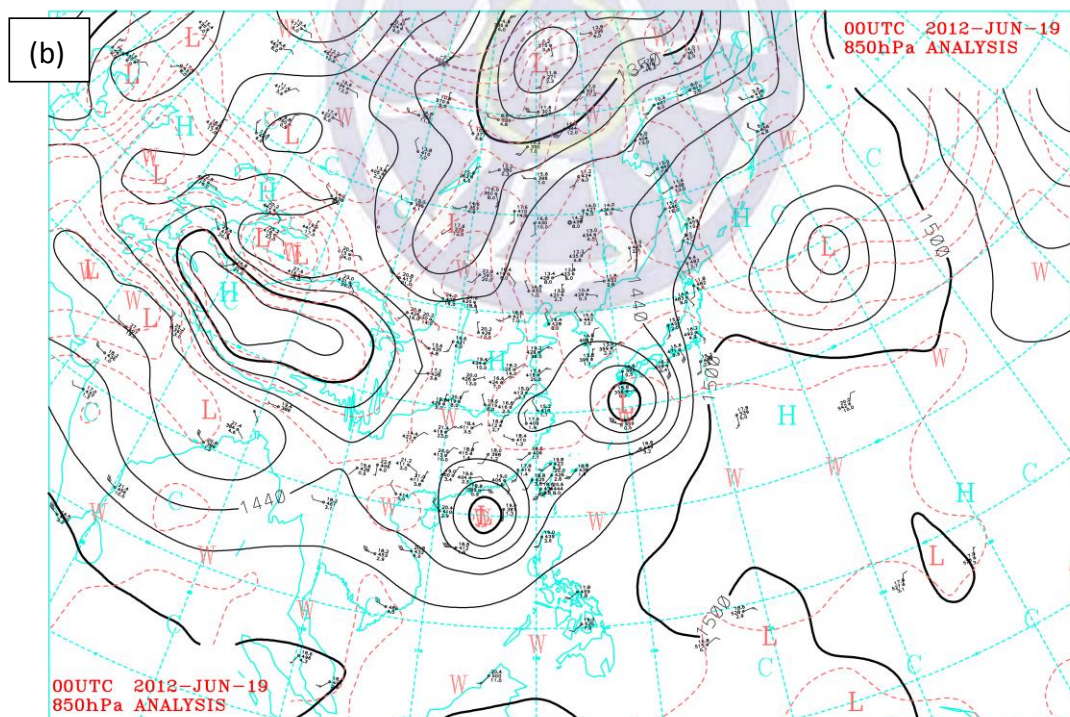
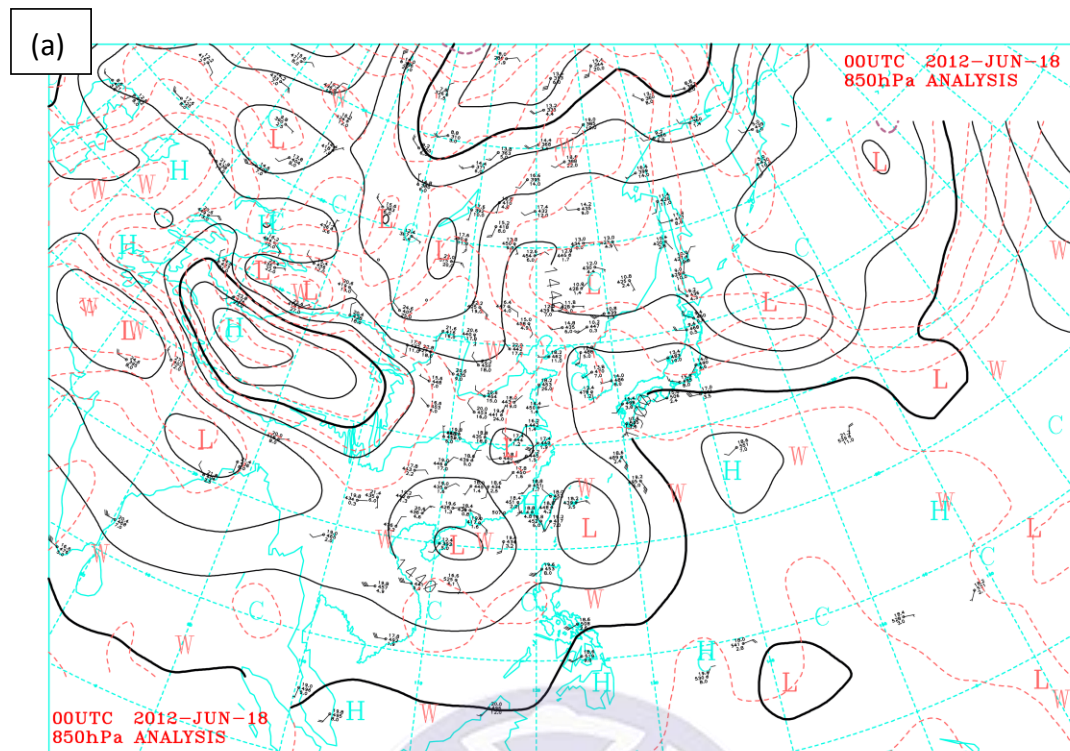


圖 3.10 待續。中央氣象局在 2012 年 6 月 18 日到 21 日之 850 hPa 的天氣圖。實線為等高線，間隔為 50 gpm。

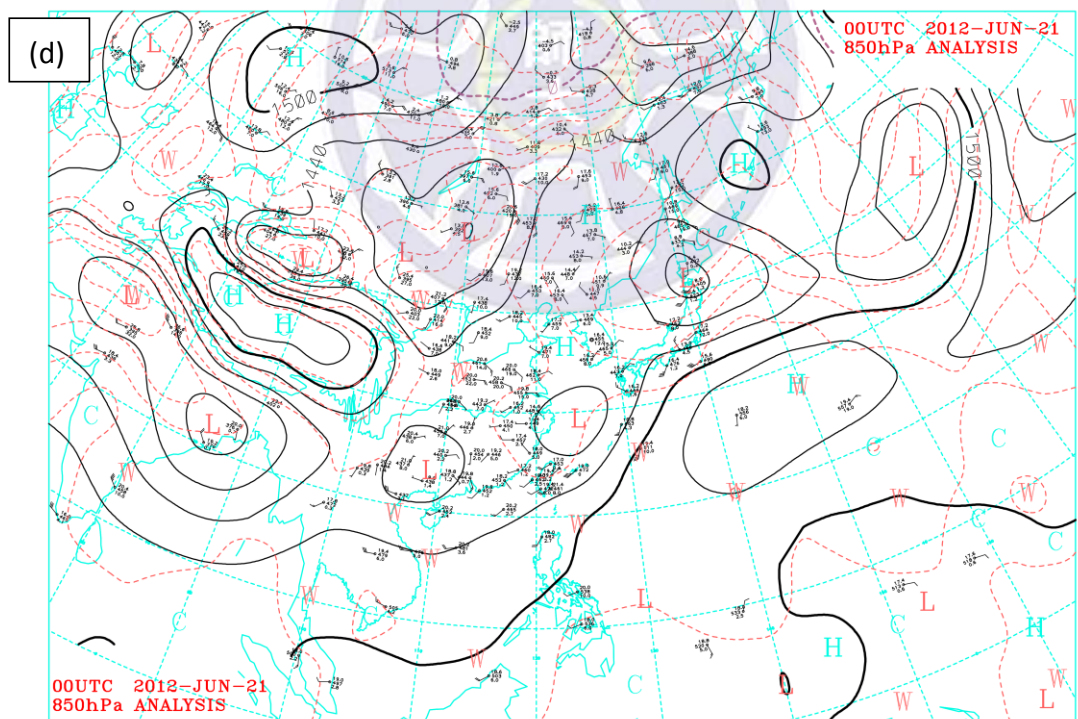
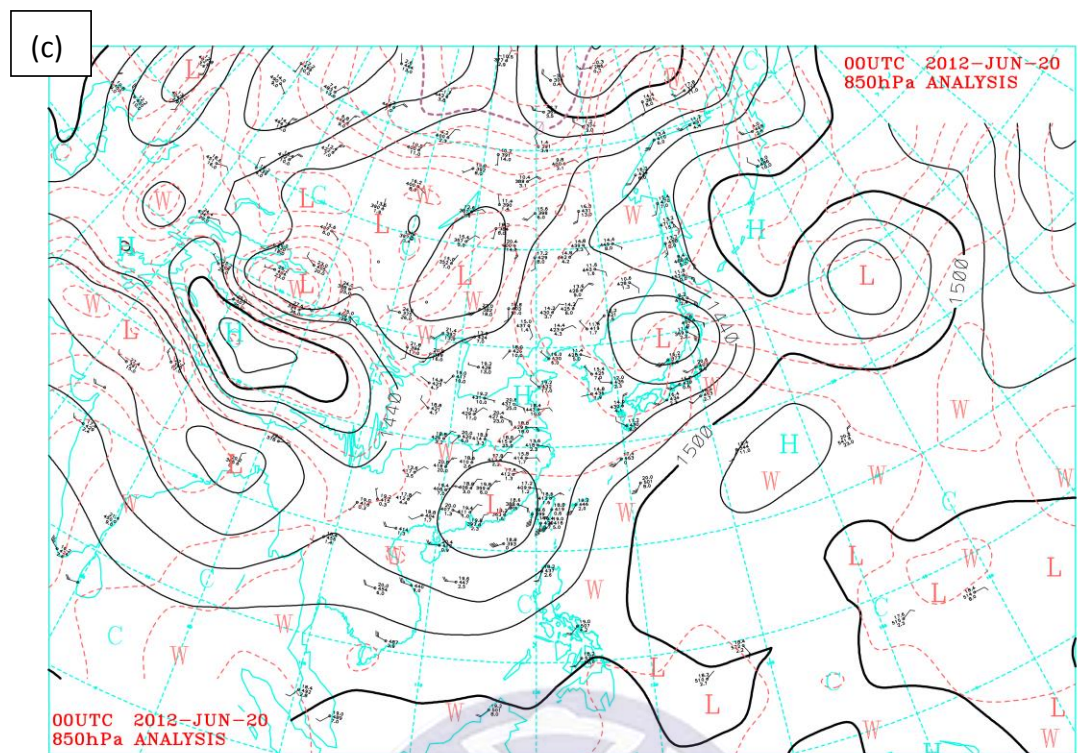


圖 3.10。完。

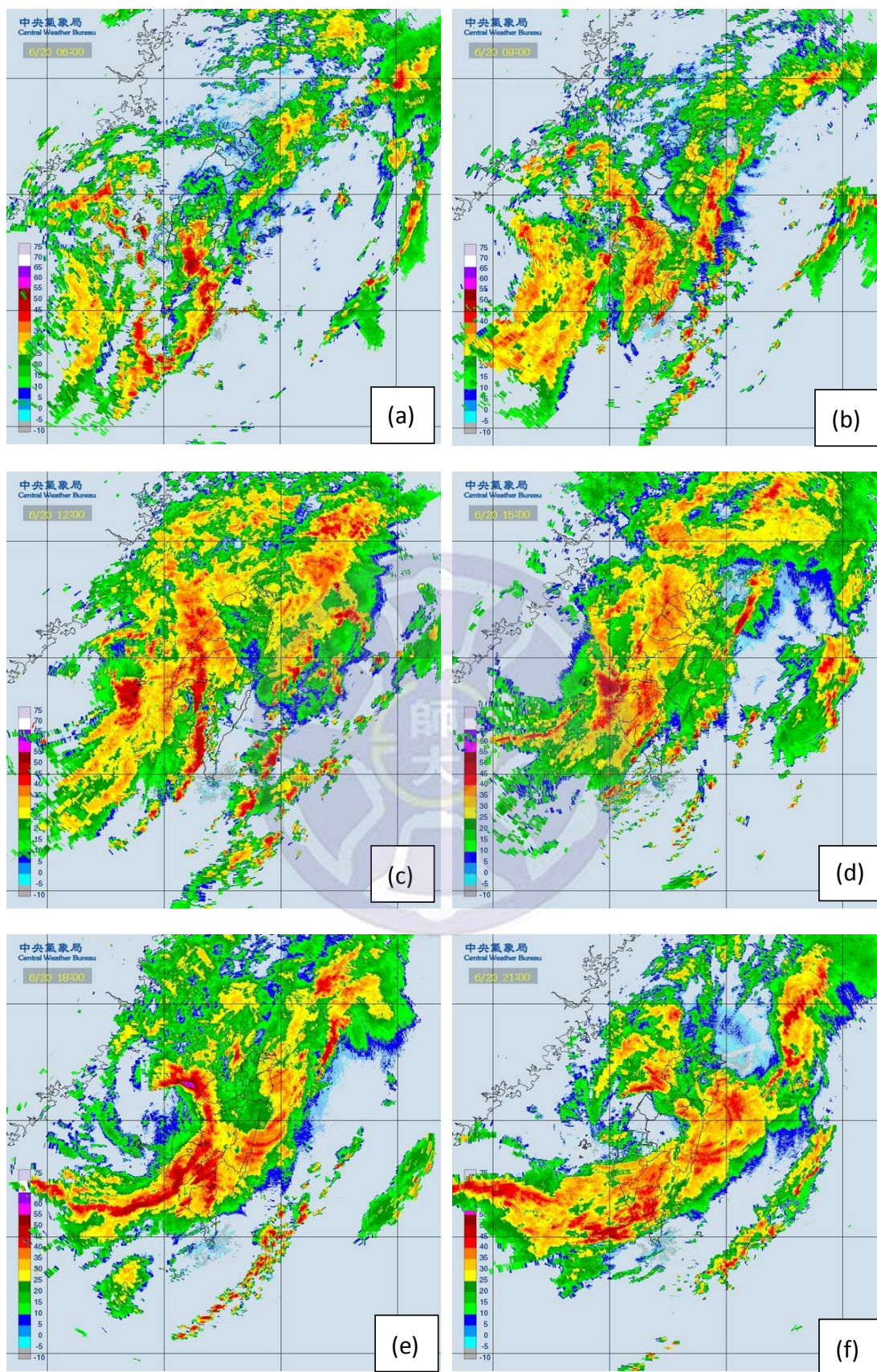
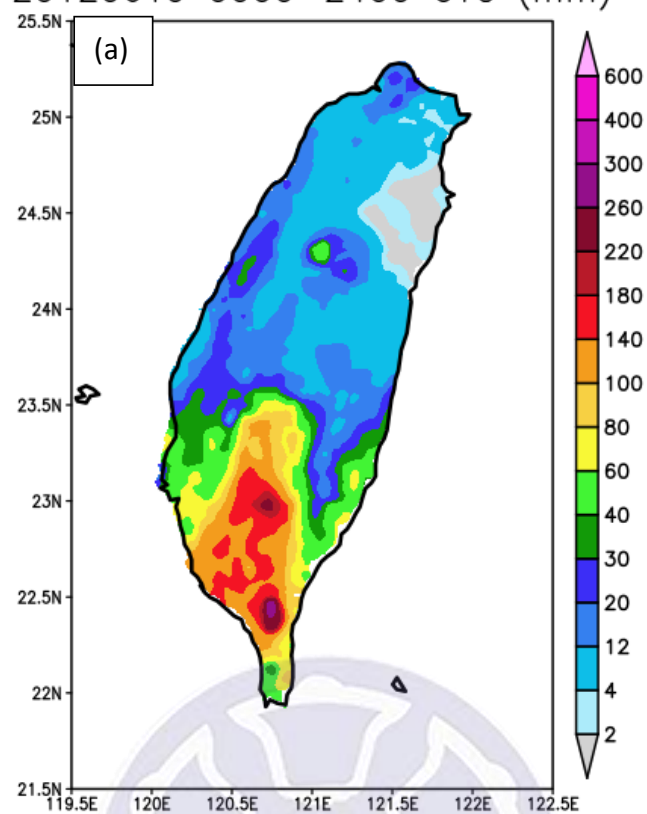


圖 3.11 泰利颱風侵台時間 6 月 20 日 0600 UTC 到 2100 UTC 的中央氣象局雷達回波圖(dBZ)。

20120619 0000-2400 UTC (mm)



20120620 0000-2400 UTC (mm)

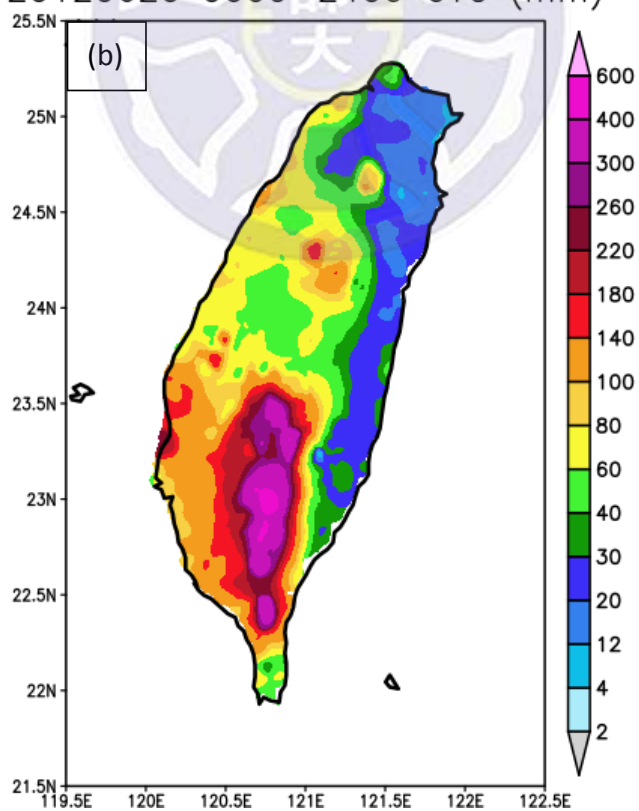


圖 3.12 為 2012 年 6 月 18 日到 20 日台灣地區日累積降雨。

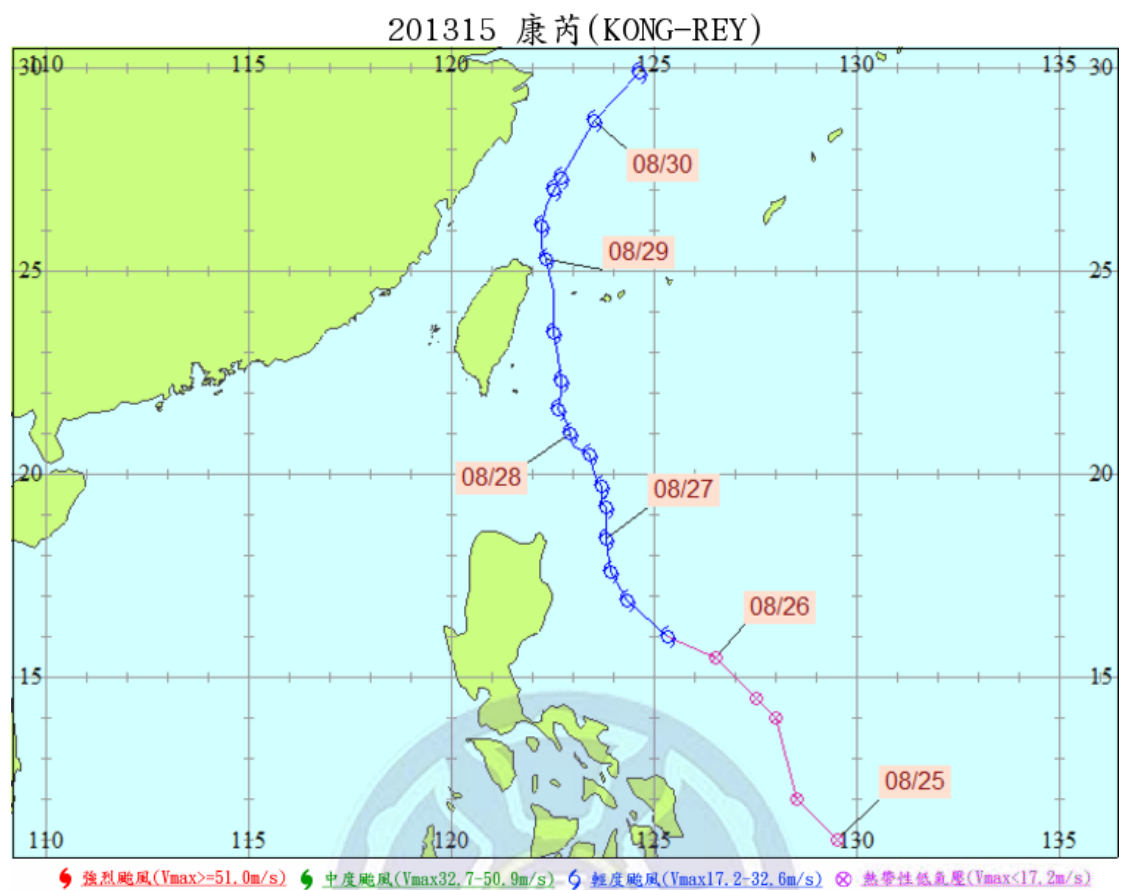


圖 3.13 中央氣象局的康芮颱風的路徑圖，時間為 UTC 制，每 6 小時一筆。不同顏色代表不同強度，如圖例所示。

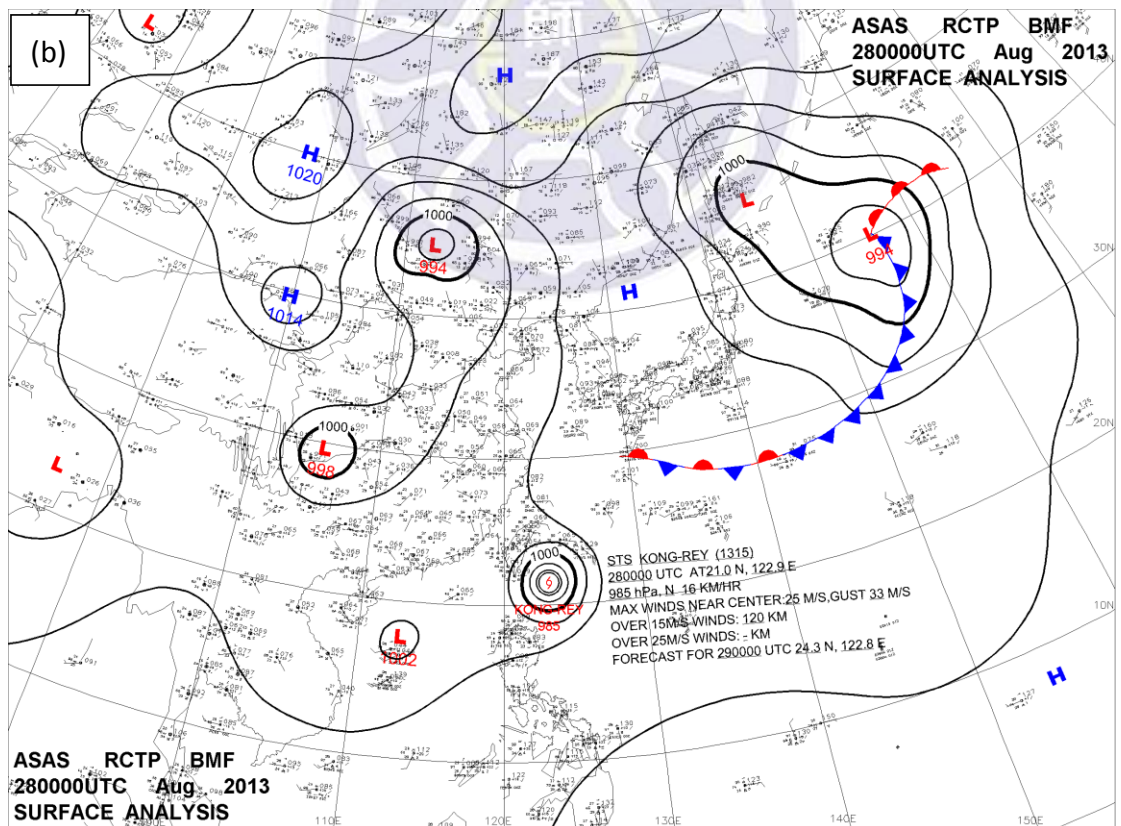
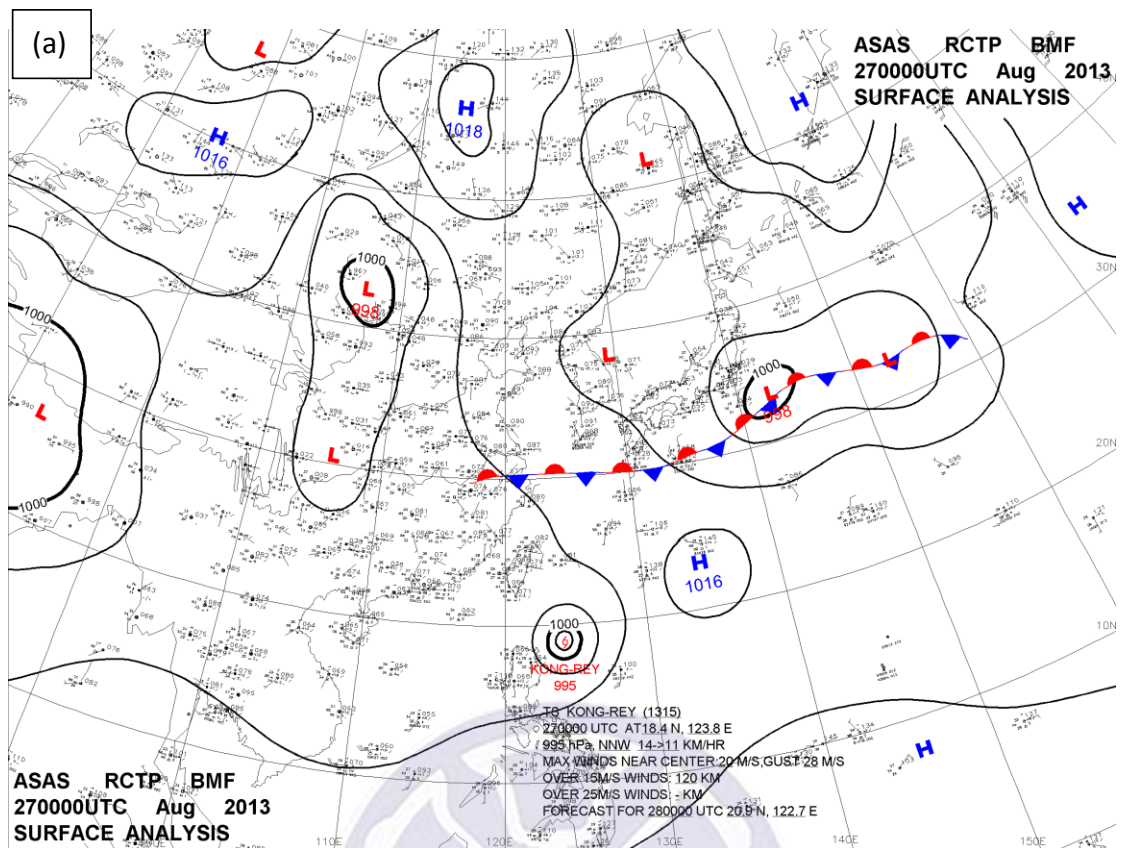


圖 3.14 待續。中央氣象局之在 2013 年 8 月 27 到 31 日的地面天氣圖。實線為等壓線，間距為 2 hPa。

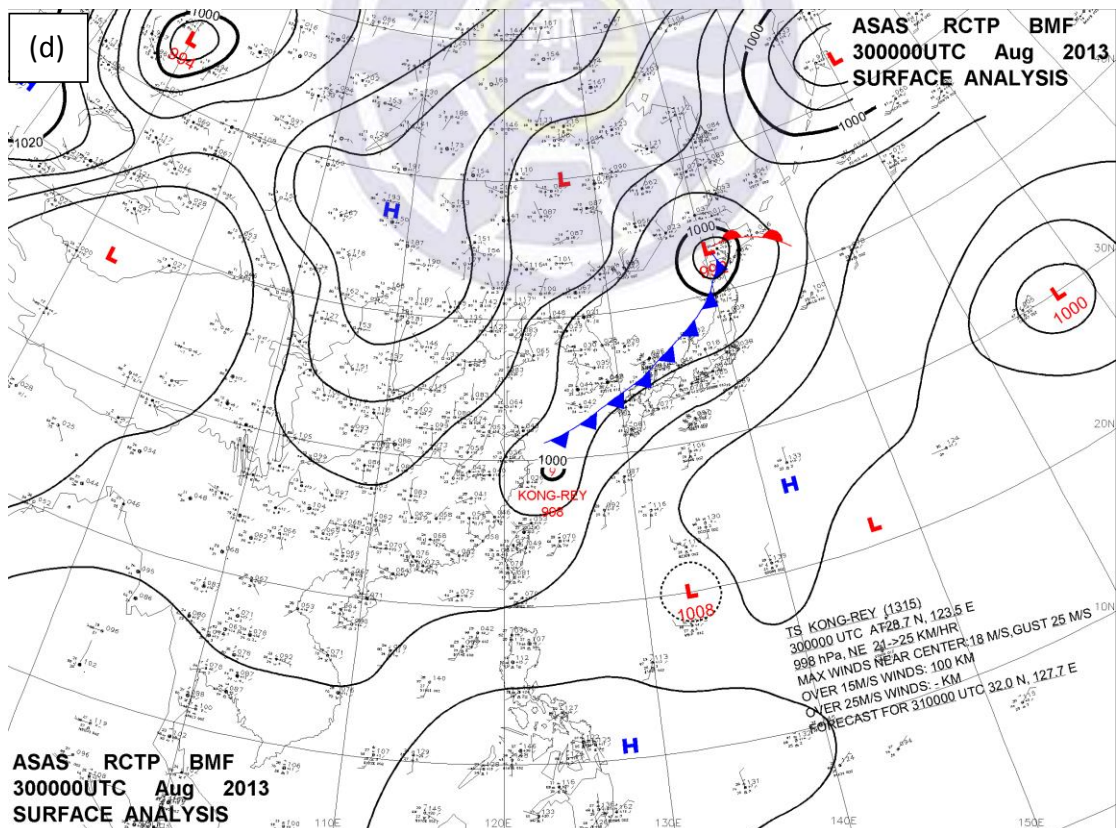
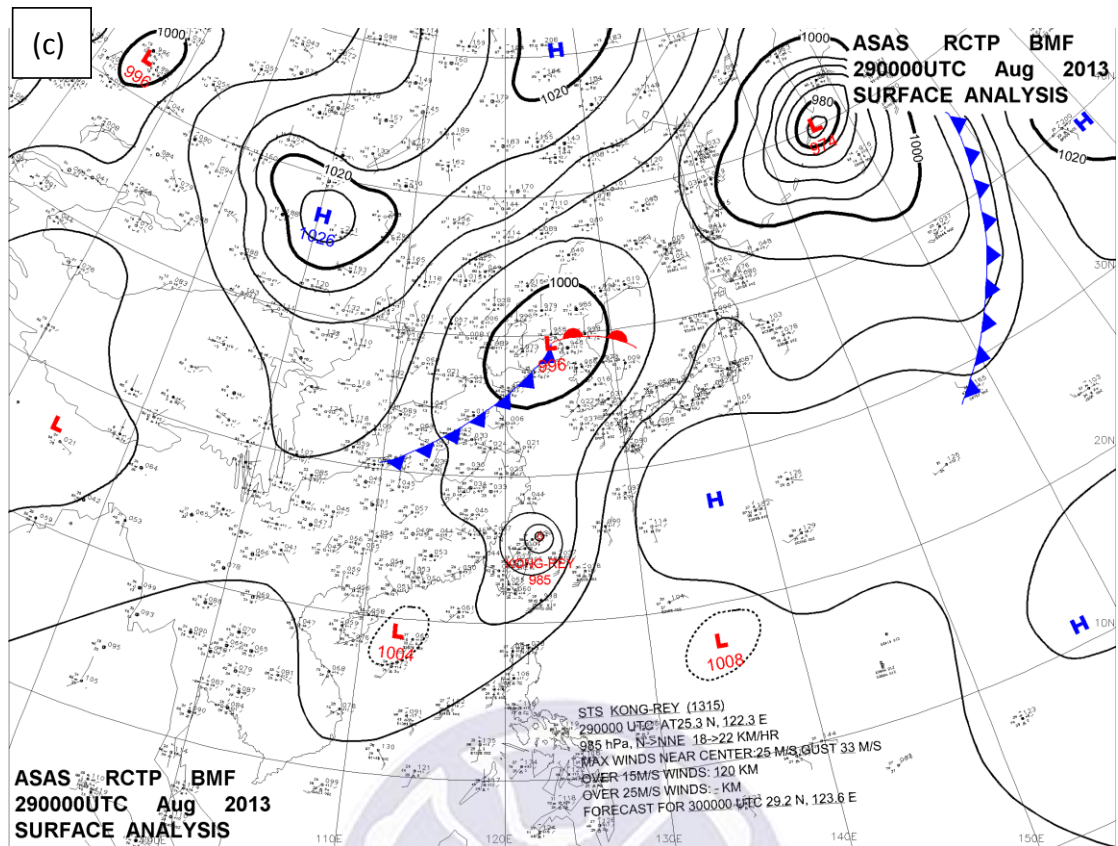


圖 3.14。

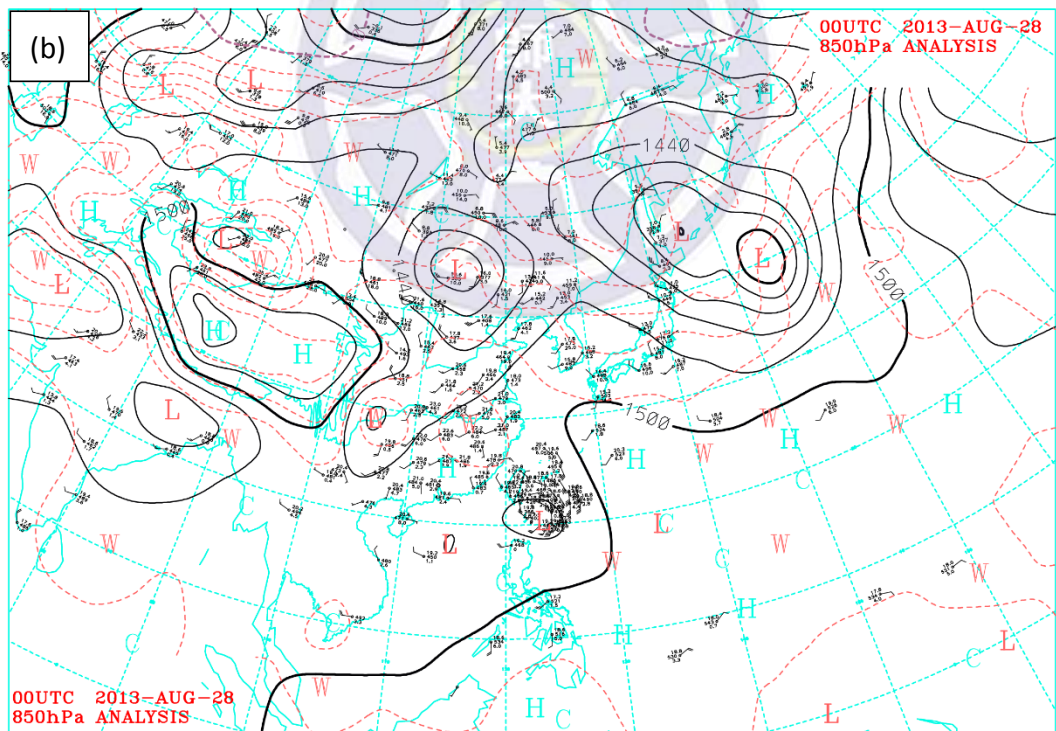
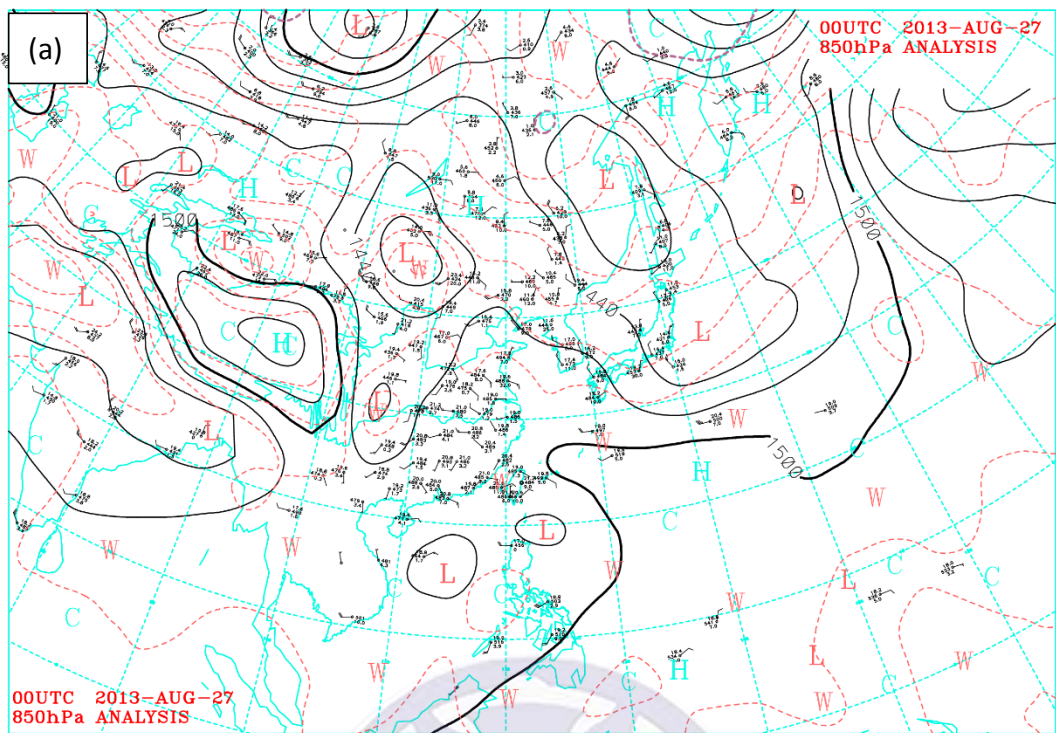


圖 3.15 待續。中央氣象局在 2013 年 8 月 27 日到 31 日之 850 hPa 的天氣圖。實線為等高線，間隔為 50gpm。

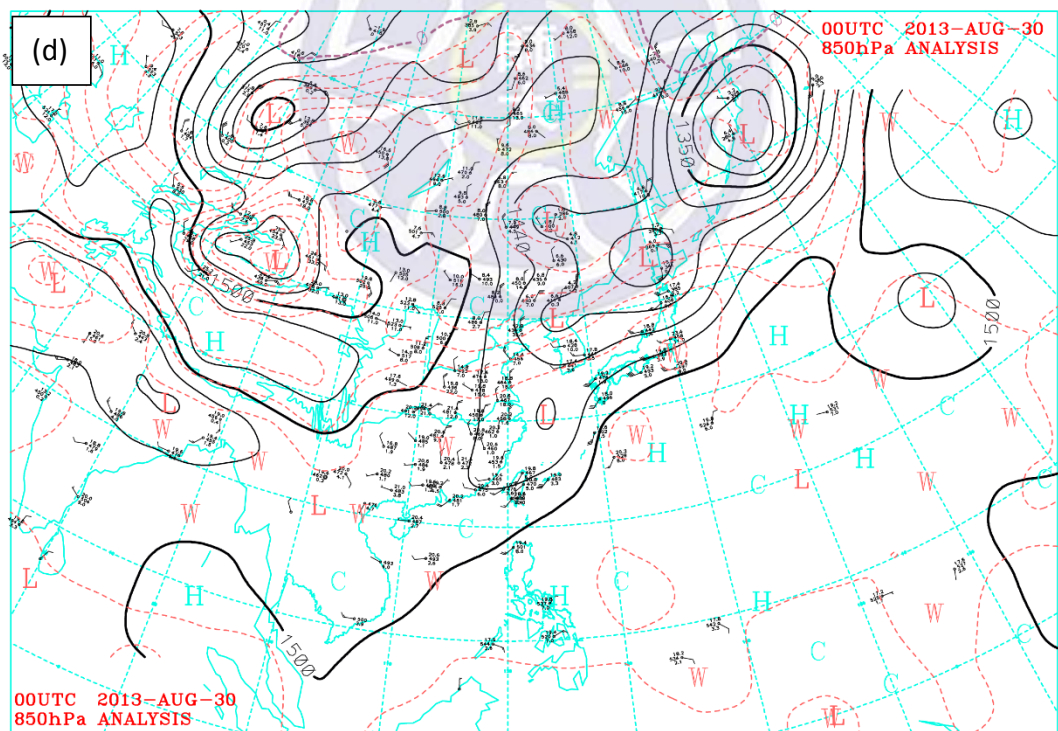
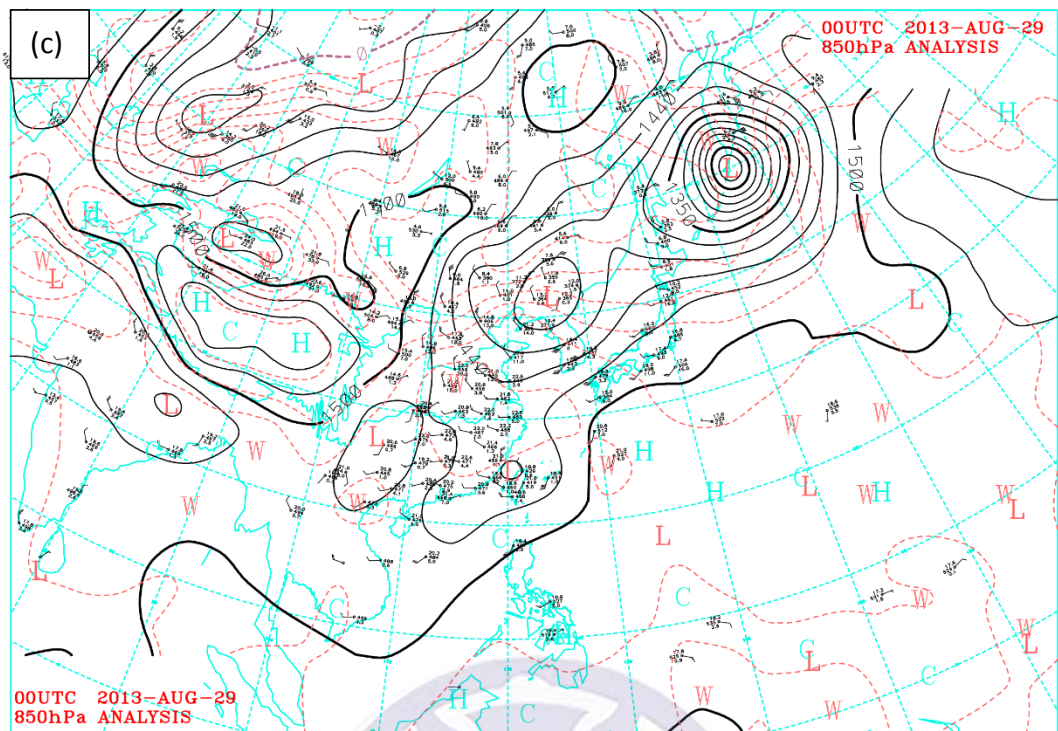


圖 3. 15

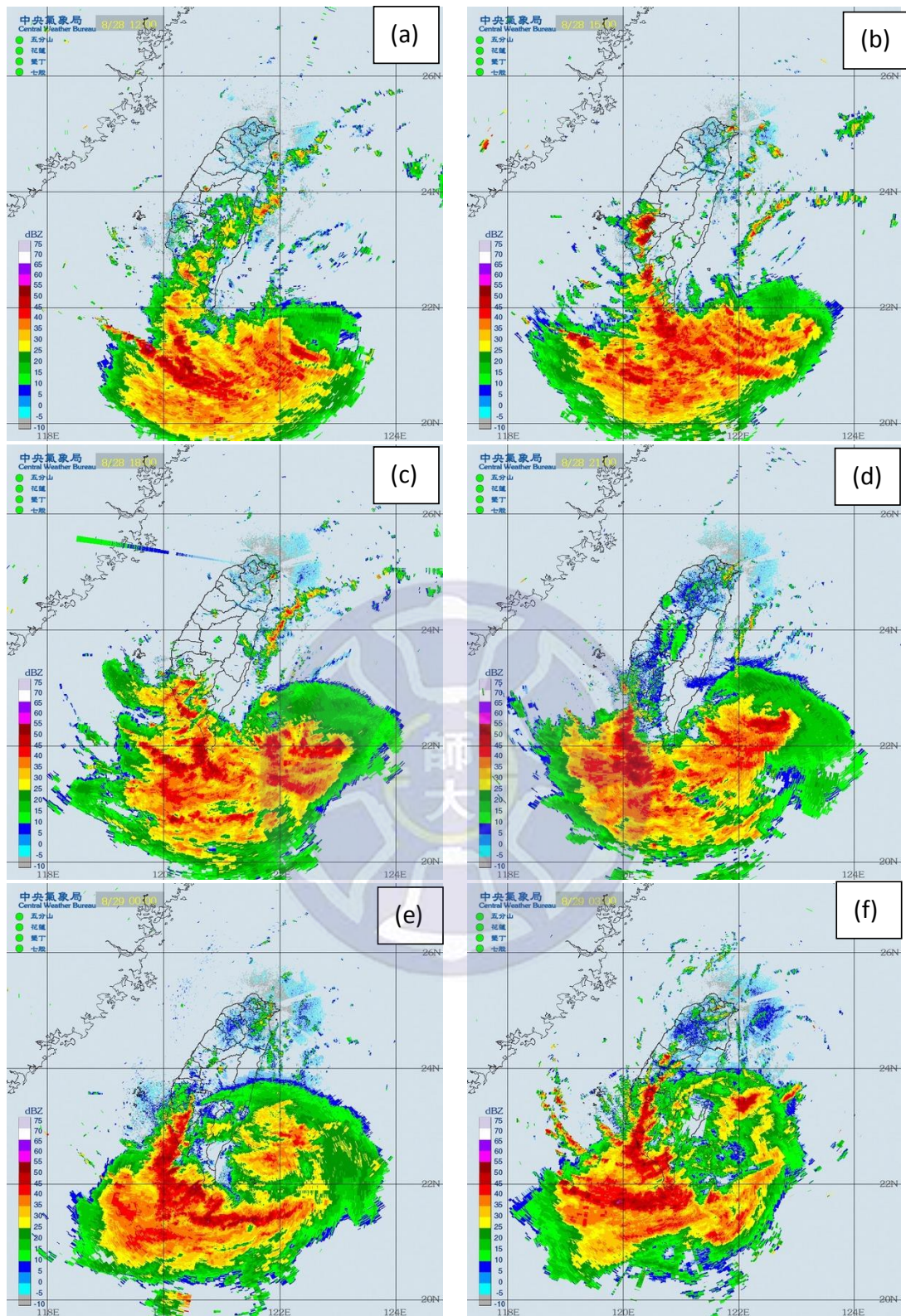


圖 3.16 待續。康芮颱風侵台時間 8 月 28 日 1200 UTC 到 29 日 2100 UTC 的中央氣象局雷達回波圖(dBZ)，每 3 小時 1 筆。

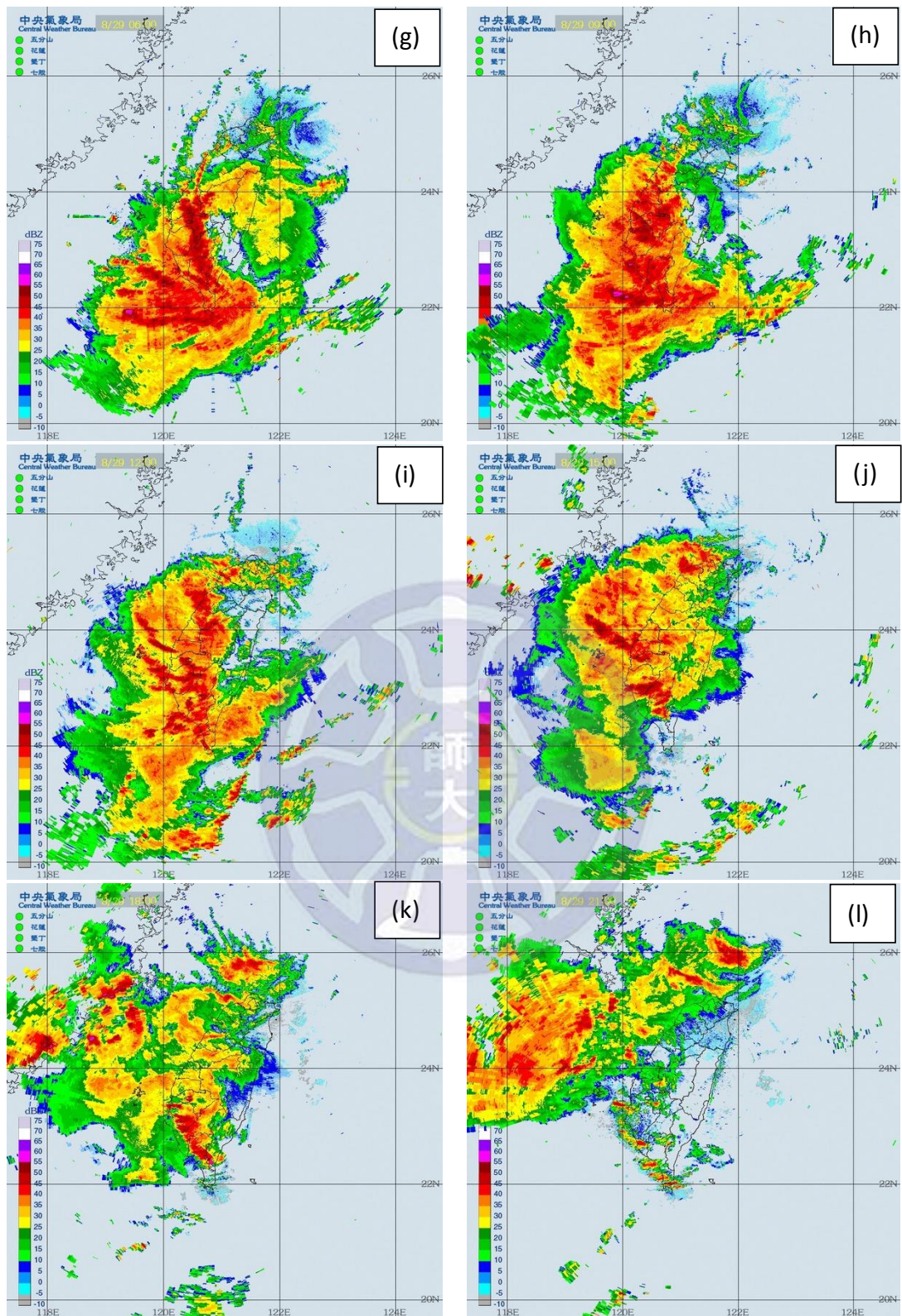
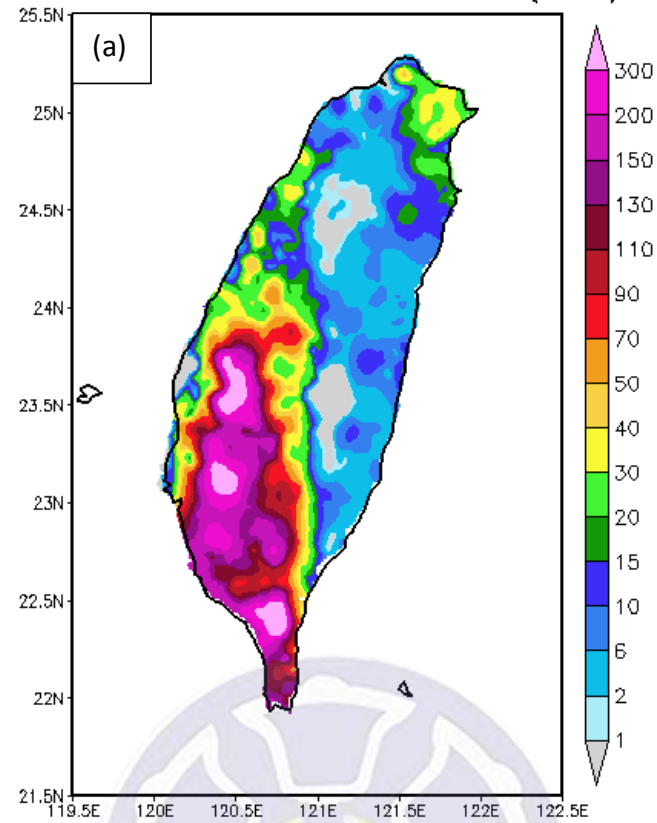


圖 3. 16

20130828 0000-2400 UTC (mm)



20130829 0000-2400 UTC (mm)

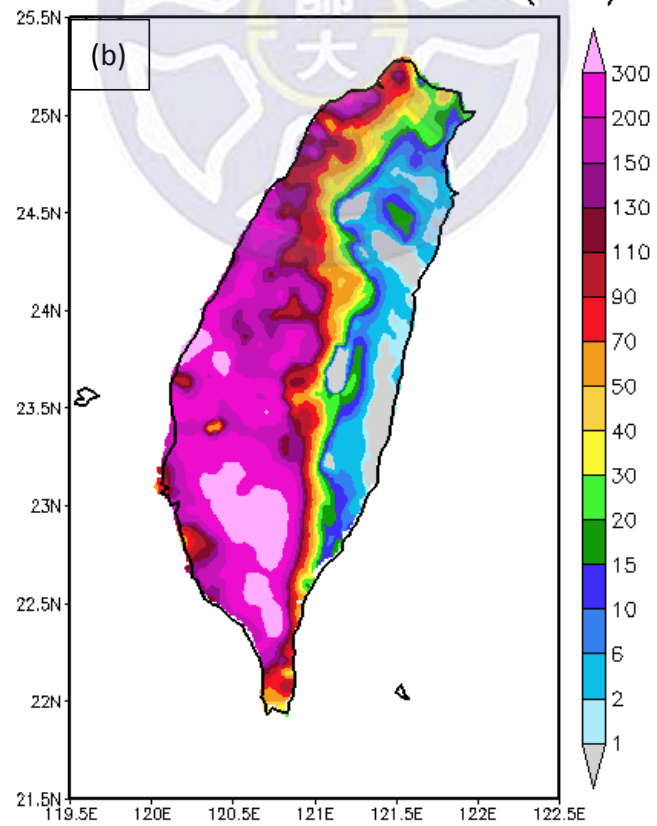


圖 3.17。台灣地區 8 月 28 到 29 日的日累積降雨圖，單位為(mm)。

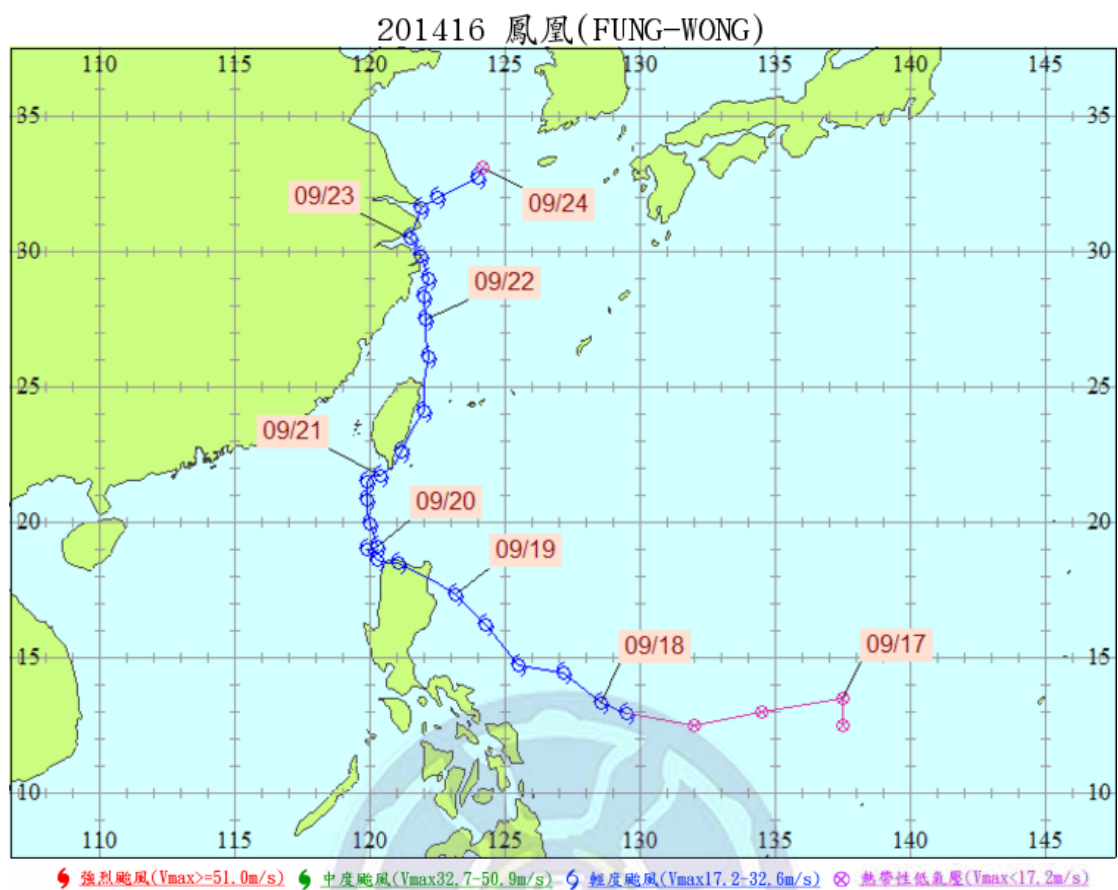


圖 3.18。中央氣象局的鳳凰颱風的路徑圖，時間為 UTC 制，每 6 小時一筆。不同顏色代表不同強度，如圖例所示。

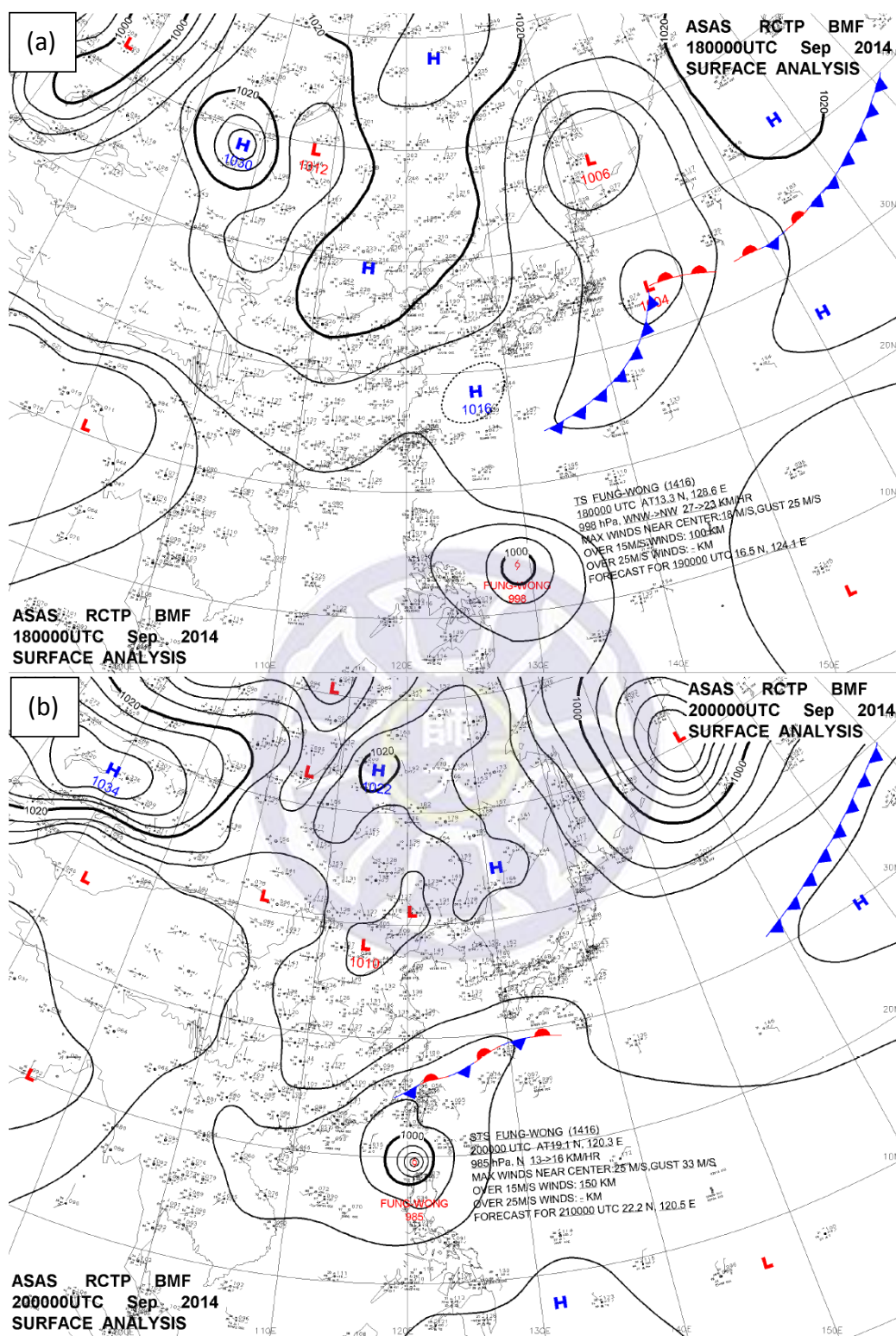


圖 3.19 待續。中央氣象局之在 2014 年 9 月 18 到 24 日的地面天氣圖。實線為等壓線，間距為 2 hPa。

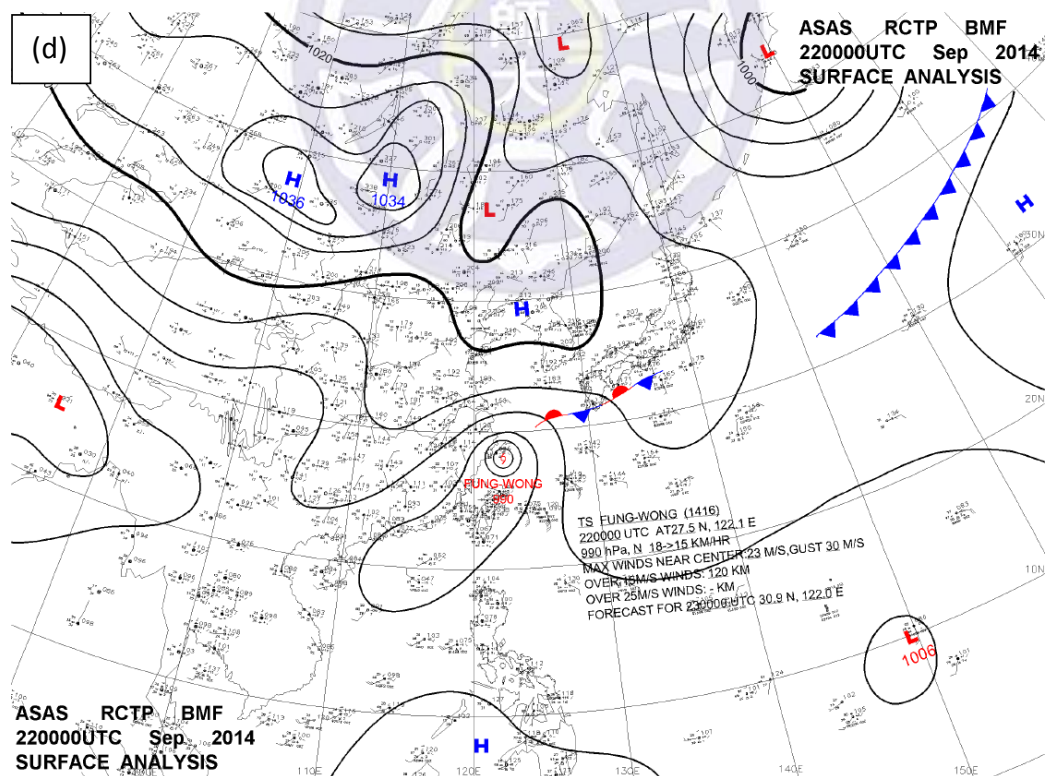
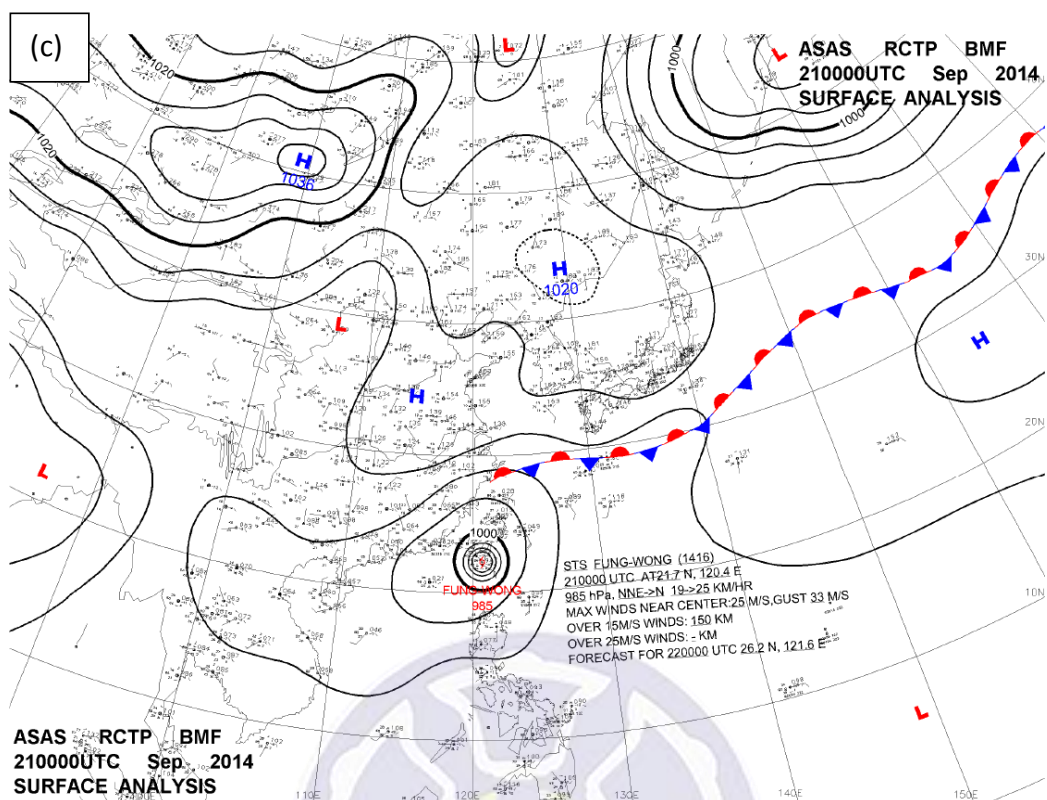


圖 3.19 待續。

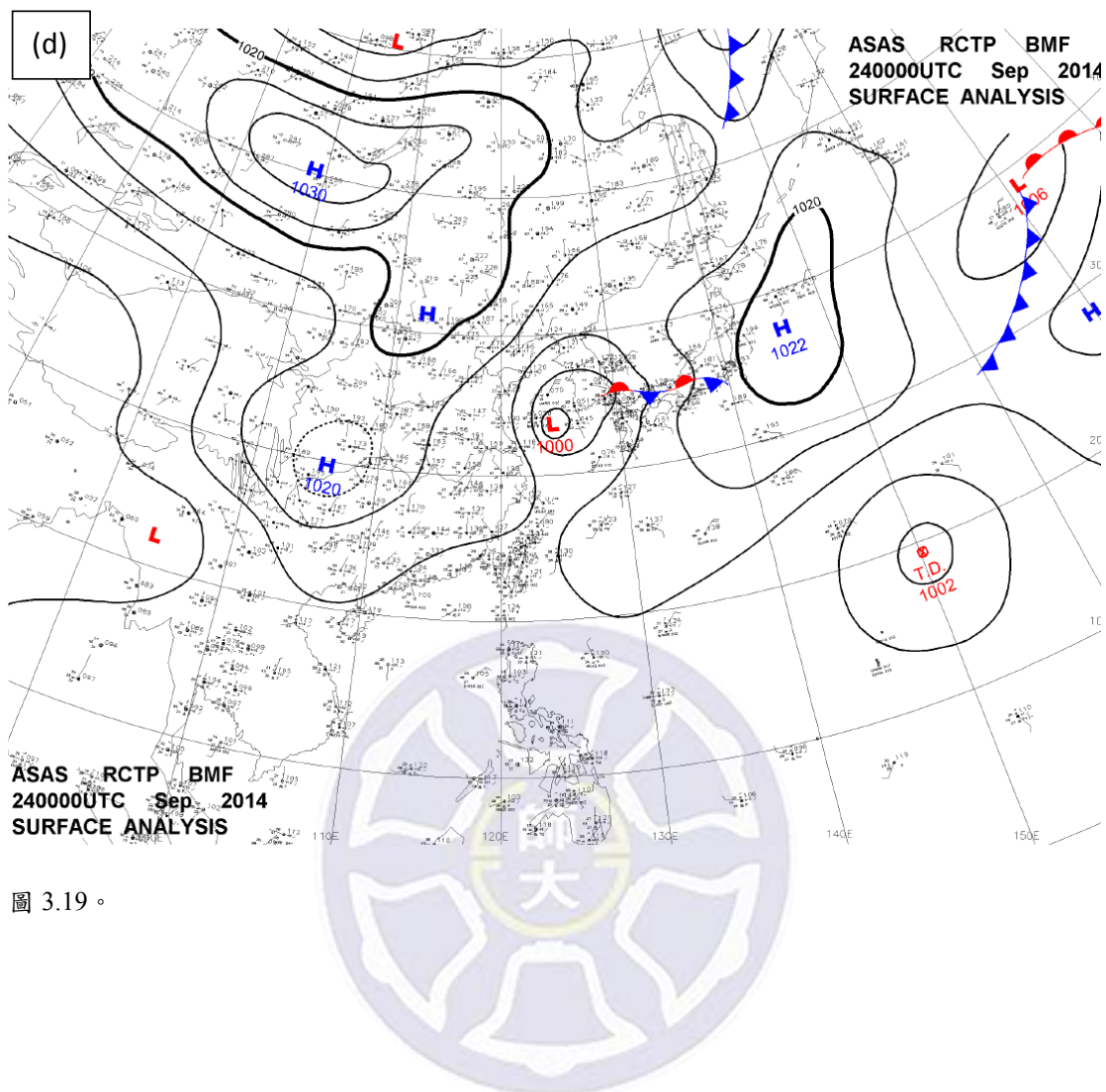


圖 3.19。

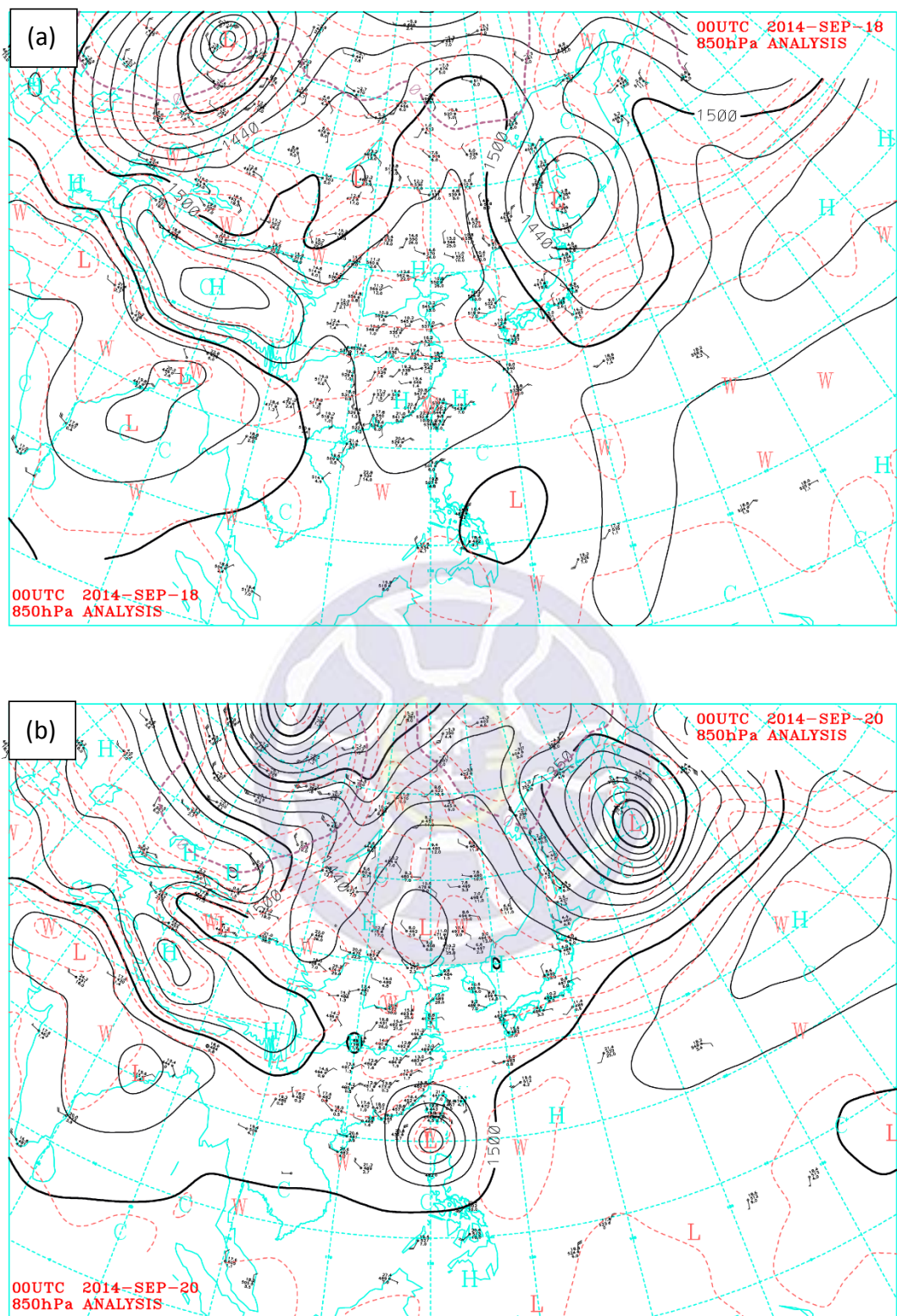


圖 3.20 中央氣象局在 2014 年 9 月 18 日到 24 日之 850 hPa 的天氣圖。實線為等高線，間隔為 50gpm。

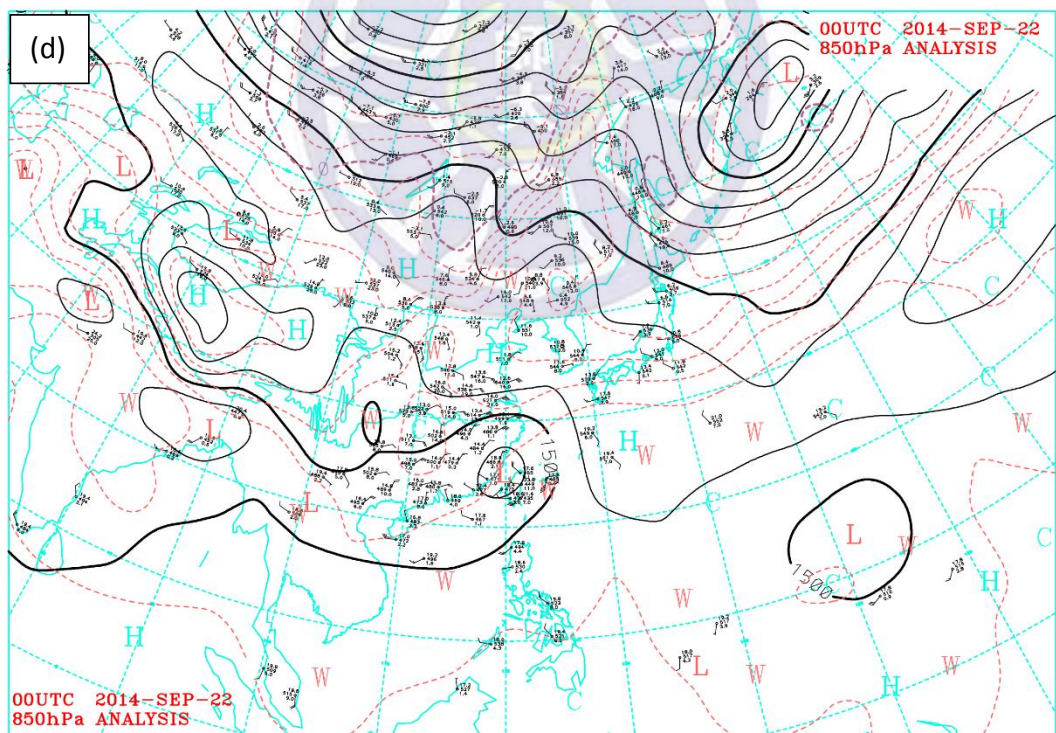
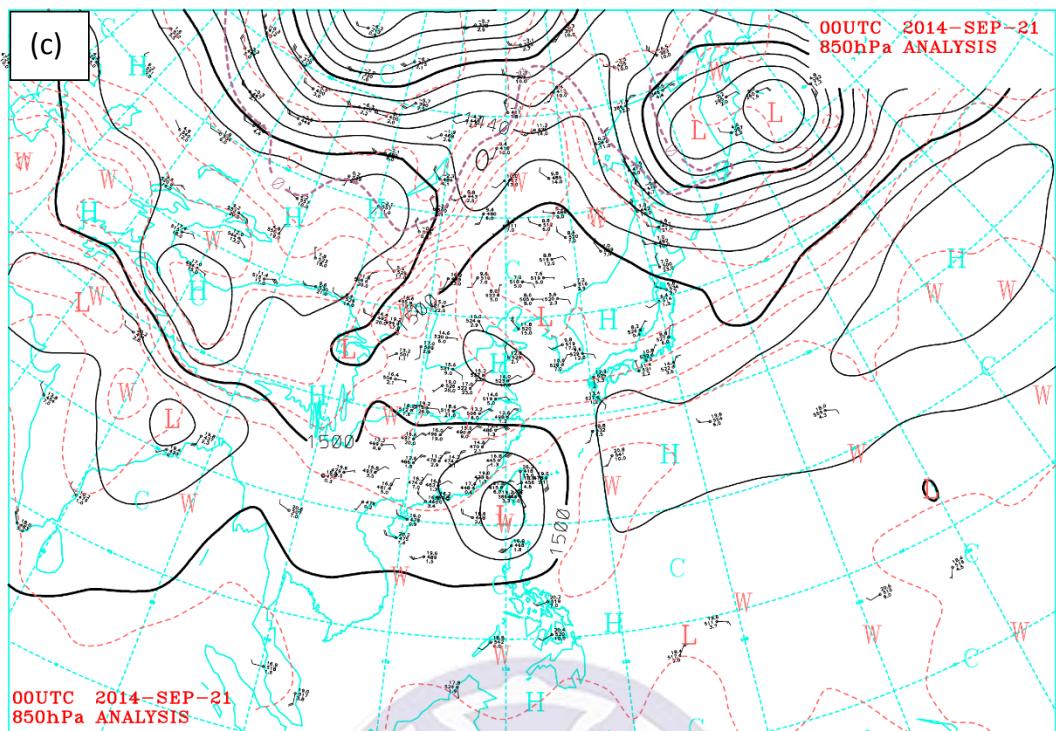


圖 3.20 待續。

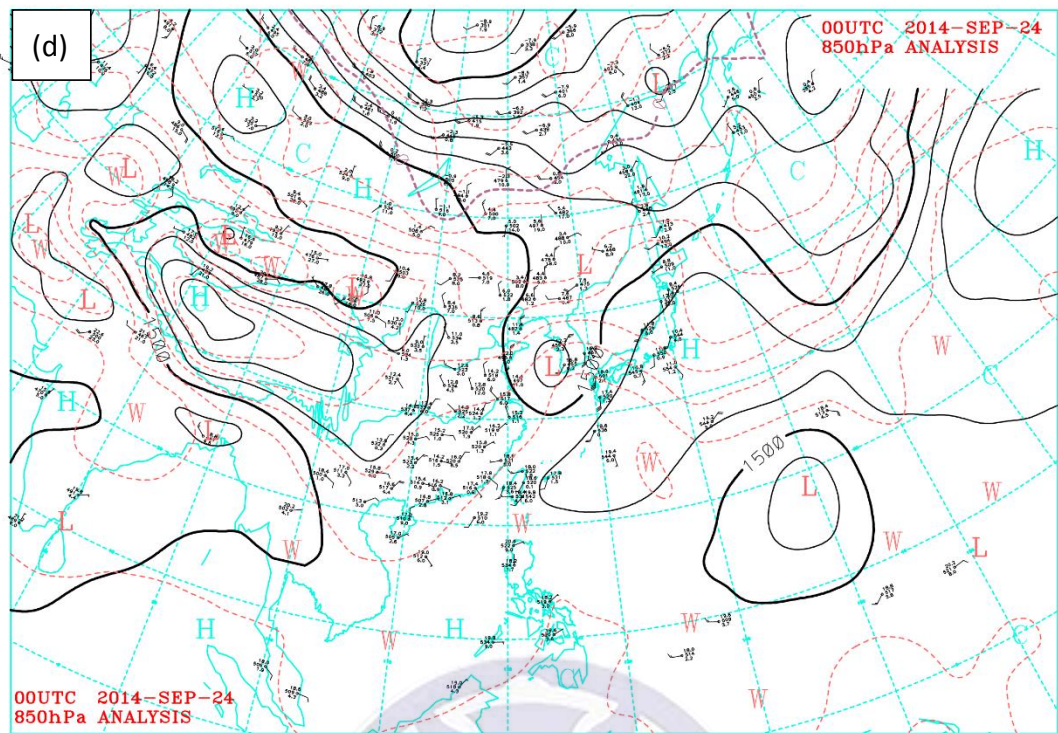


圖 3.20。



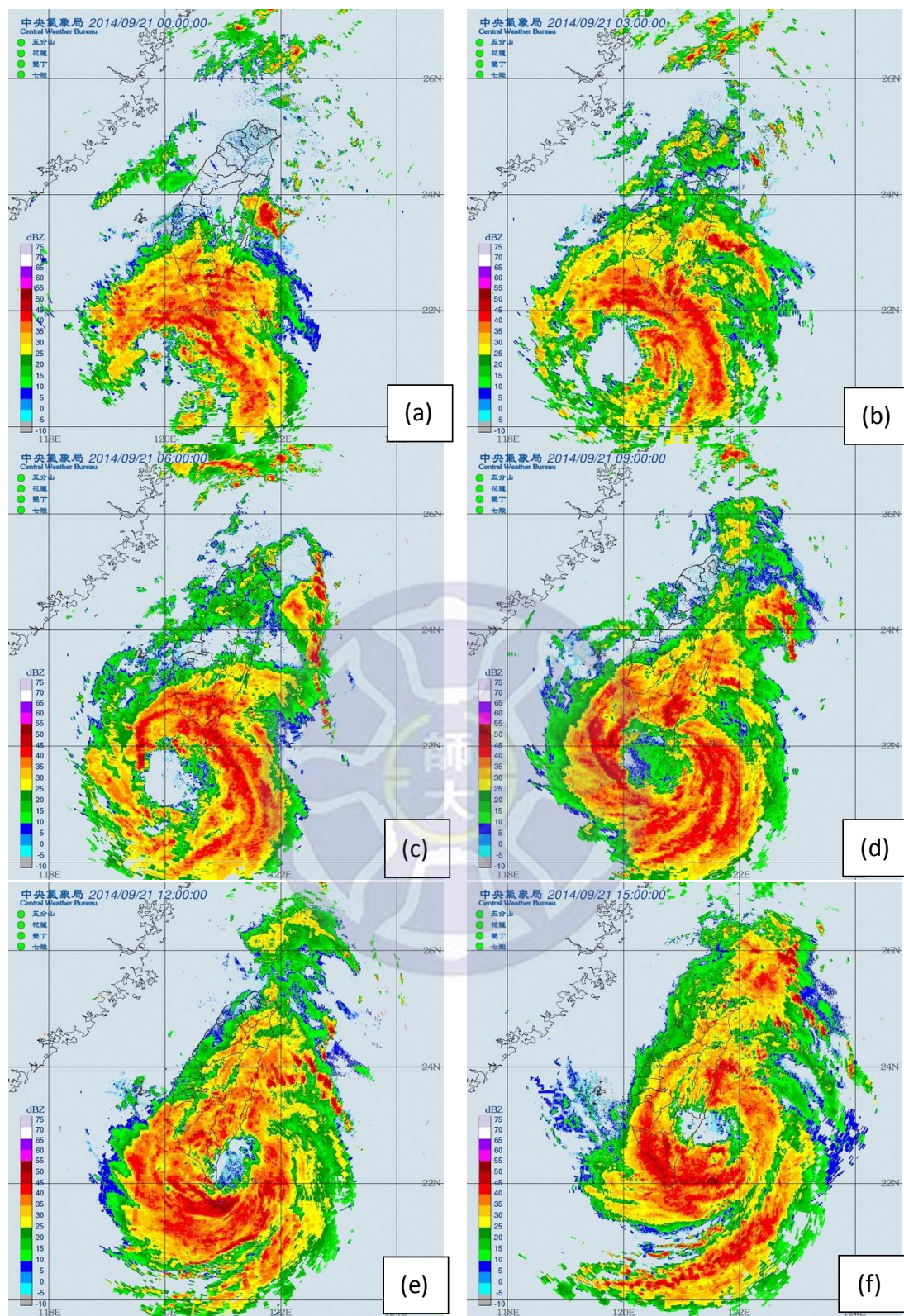


圖 3.21。鳳凰颱風侵台時間 9 月 21 日 0000 UTC 到 22 日 0900 UTC 的中央氣象局雷達回波圖 (dBZ)。

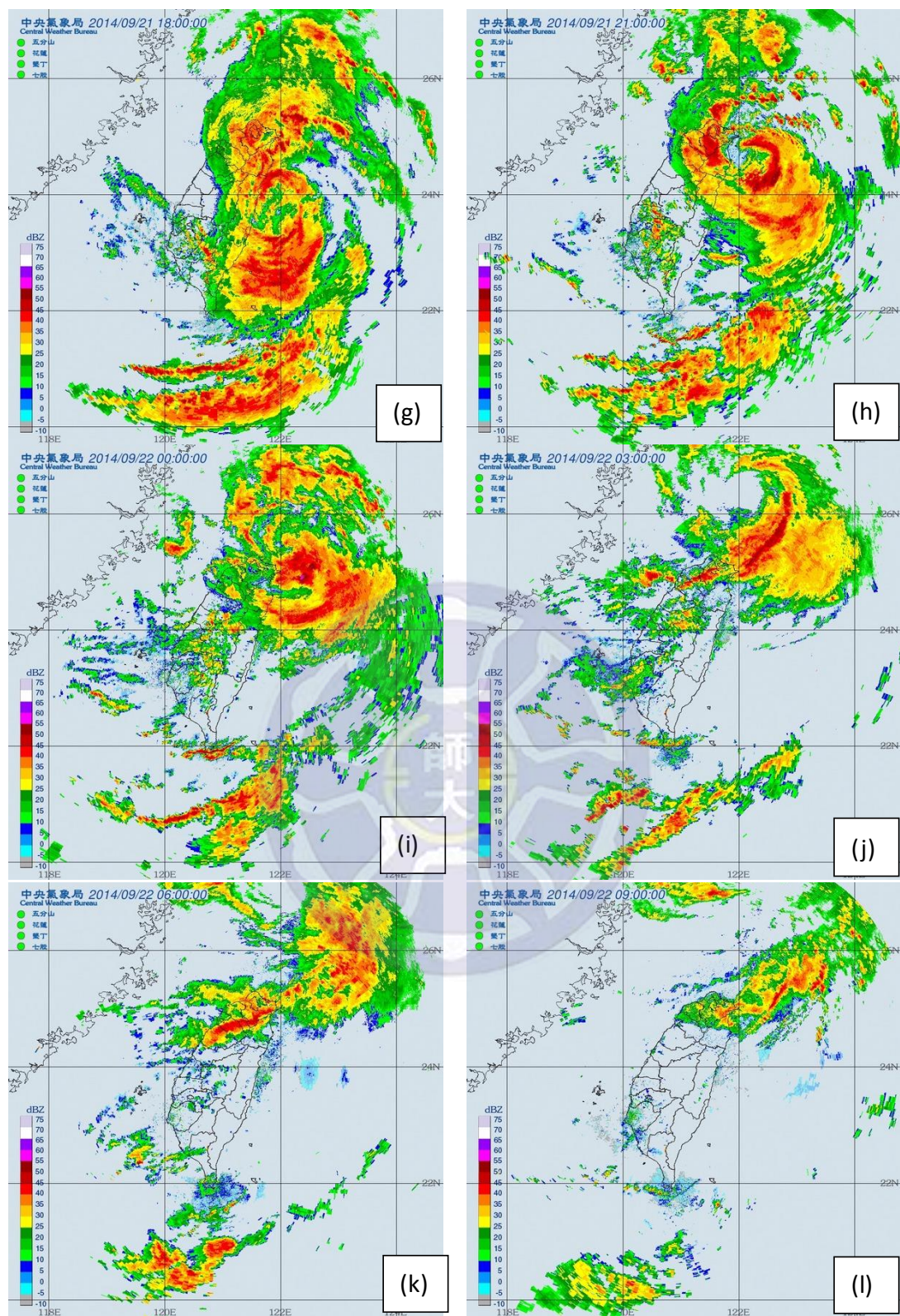
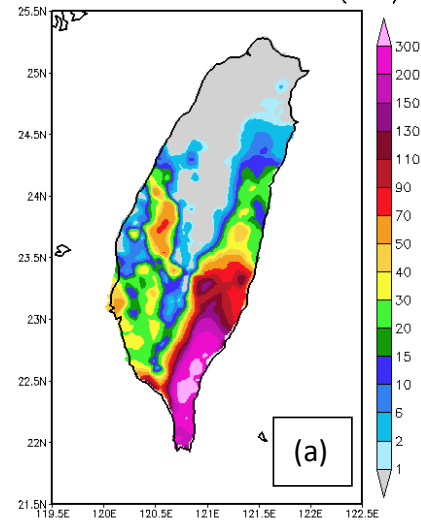
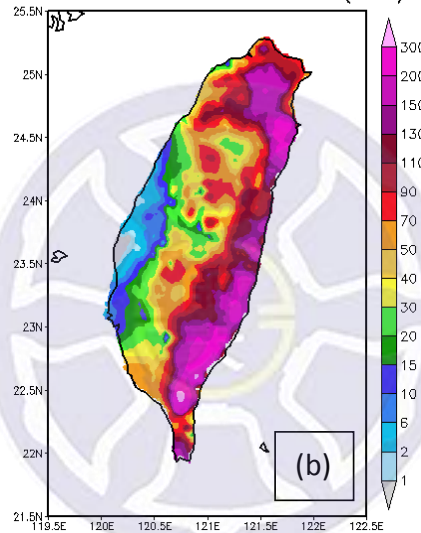


圖 3.21。

20140920 0000-2400 UTC (mm)



20140921 0000-2400 UTC (mm)



20140922 0000-2400 UTC (mm)

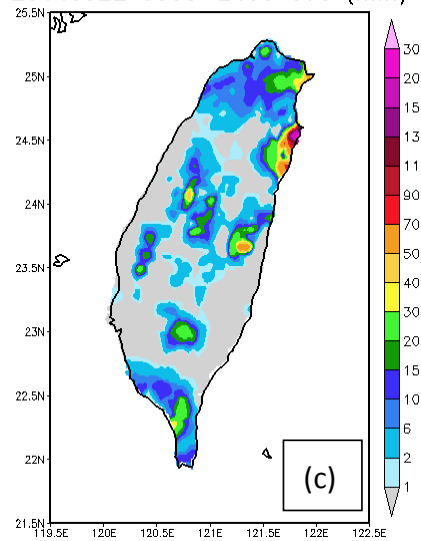


圖 3.22 台灣地區 9 月 20 到 22 日的日累積降雨圖，單位為(mm)。

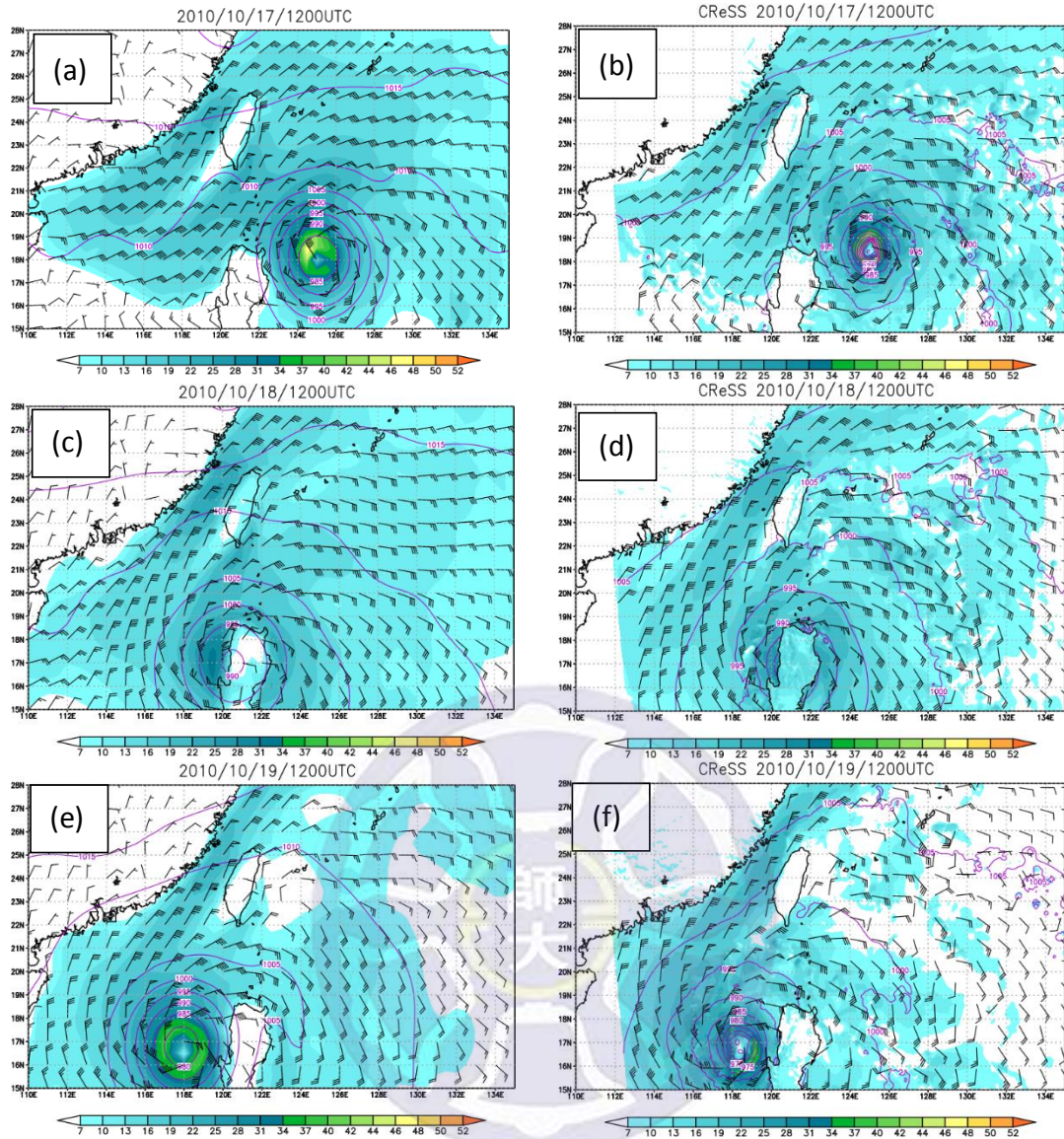


圖 4.1，待續。2010 年 10 月 17 日到 22 日之 1200 UTC，(a)(c)(e)(g)(i)(k)為 NCEP GFS 的 1000hPa 的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、風速(色階：單位 ms^{-1})、海平面氣壓(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)以及對應到的(b)(d)(f)(h)(j)(l)為同一個時間的 CReSS，離地表 50m 高的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、10 公尺高的風速(色階：單位 ms^{-1})，和氣壓場(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)。

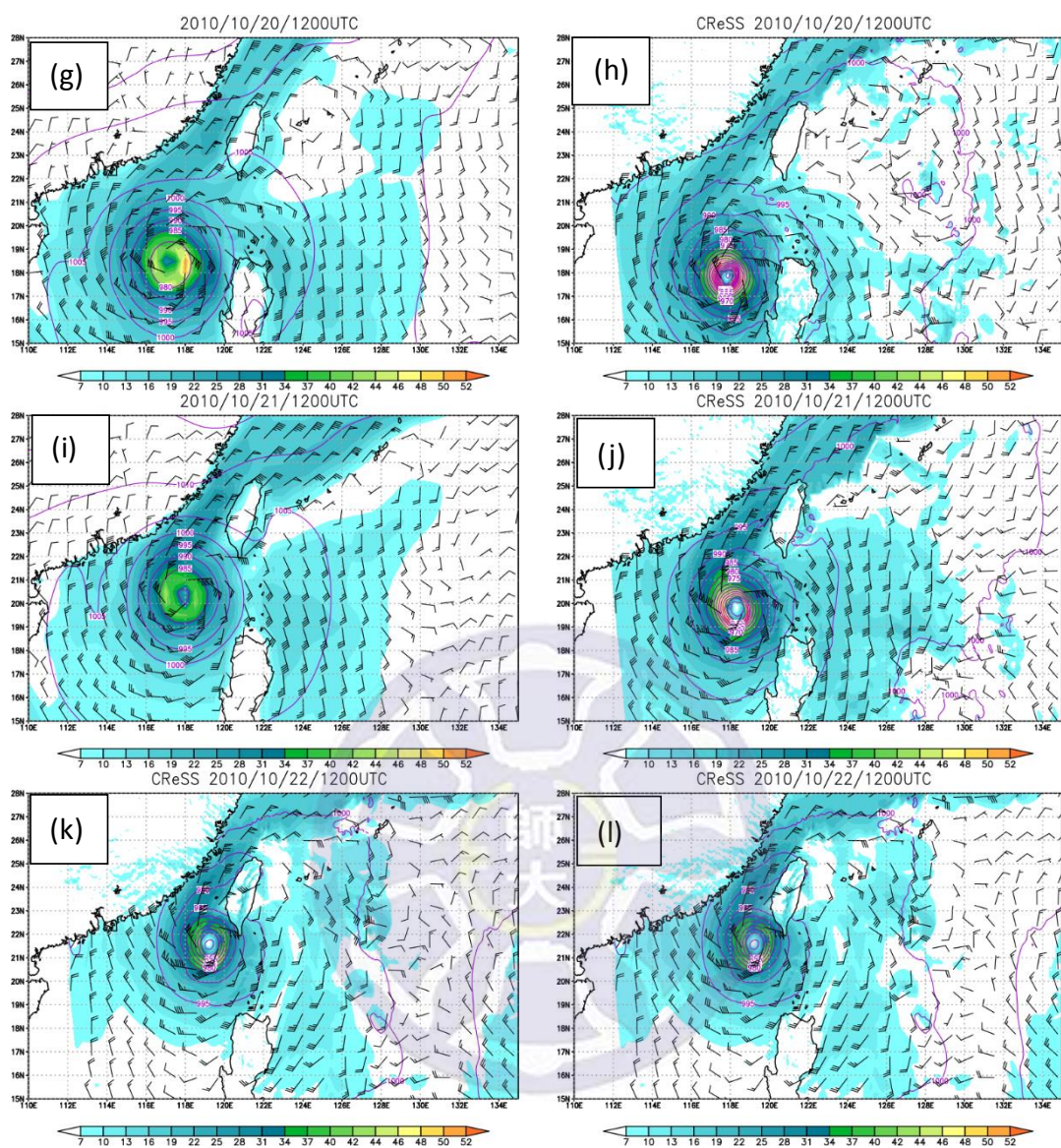


圖 4.1，完。

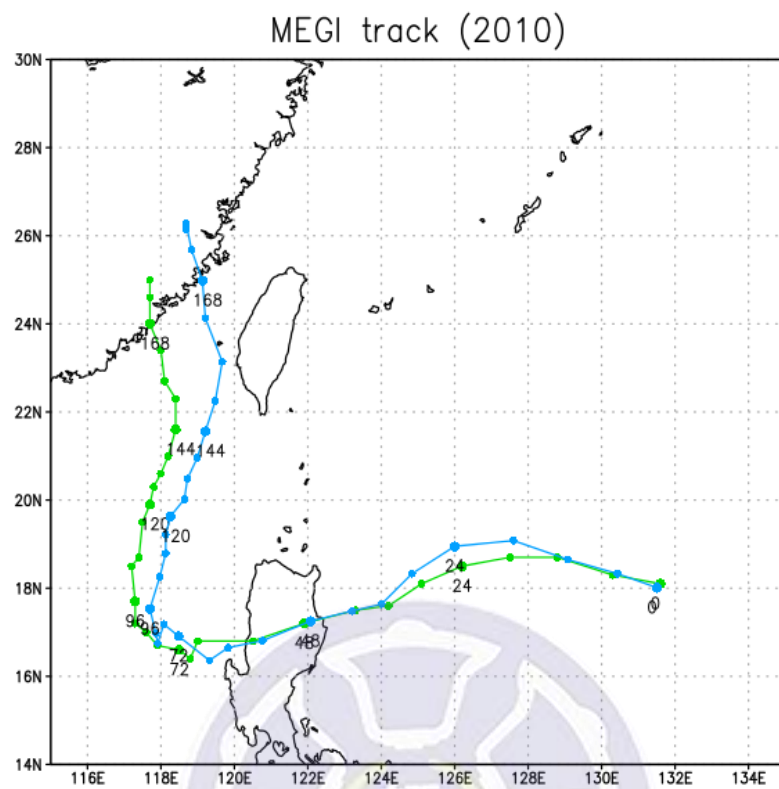


圖 4.2。為 MEI 和 CWB 路徑比較圖，每 6 小時打一個點，每 24 小時標記一次。

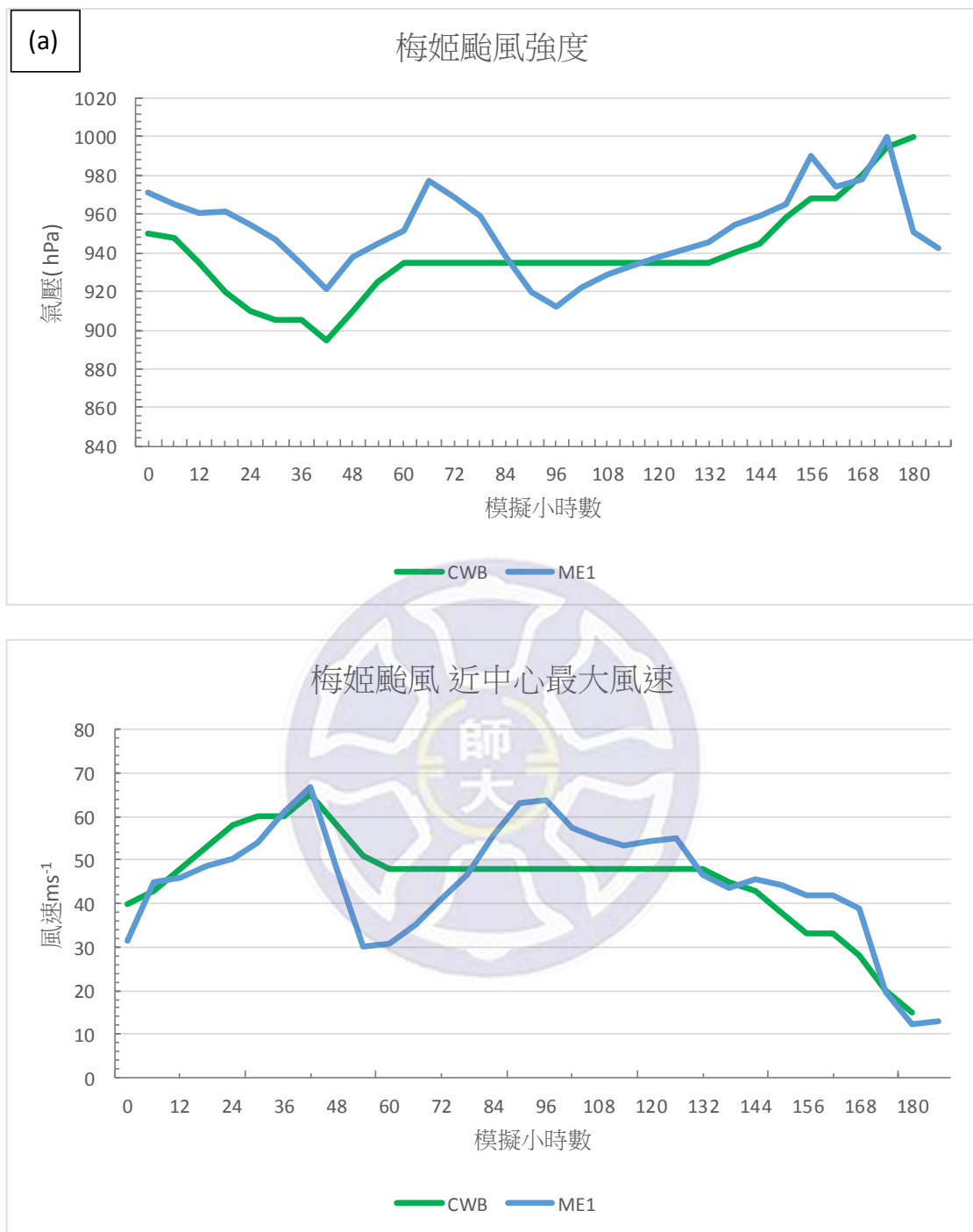


圖 4.3 為模擬 ME1 和 CWB 觀測資料之中心氣壓 (hPa)和近中心最大風速 (ms^{-1})比較圖

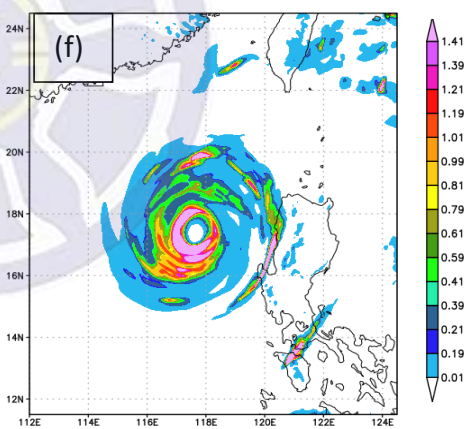
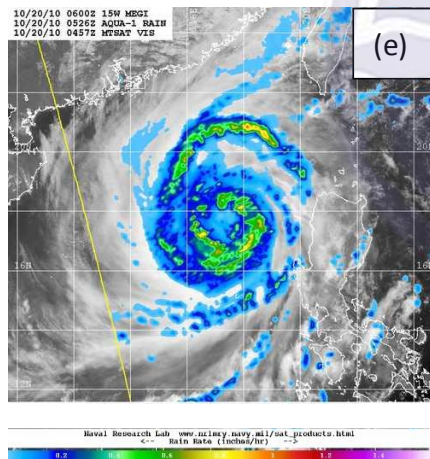
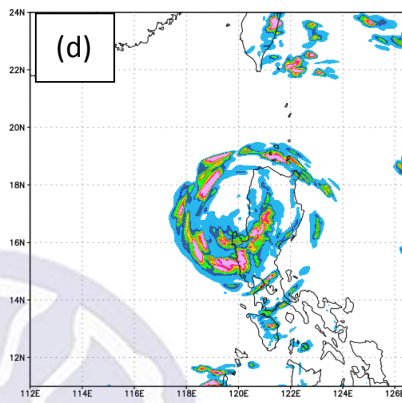
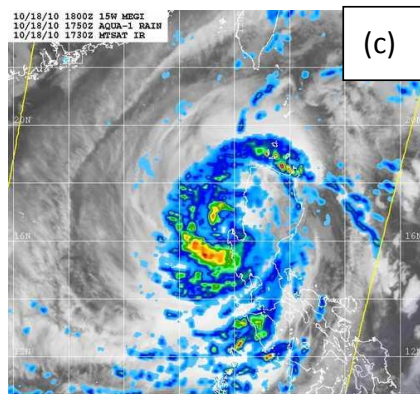
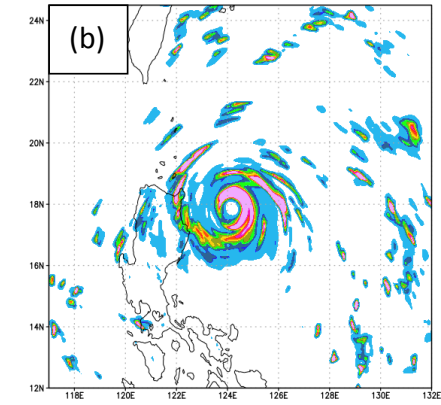
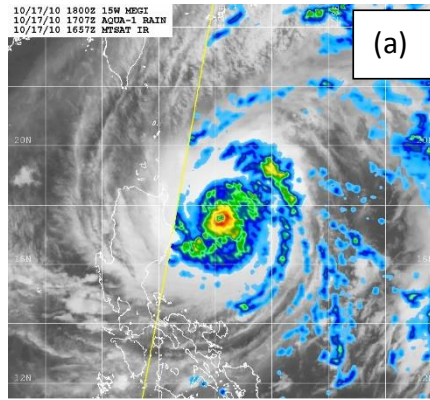


圖 4.4 待續。(a)(c)(e)(g)(i)(k)為 NRL 衛星資料，參數為降雨強度(inches/hr)。 (b)(d)(f)(h)(j)(l)為 CReSS 輸出之降雨強度。時間上為(a)：10/17 1707 UTC；(c)：10/18 1707 UTC；(e)10/20 0526 UTC；(g)：10/20 1737 UTC；(i)：10/21 1820 UTC；(k)：10/22 0515 UTC。(a)(b)為接近的時間。

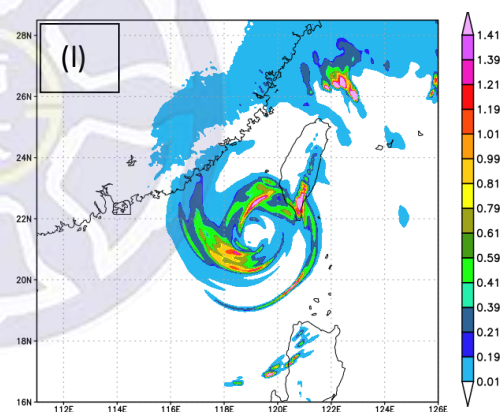
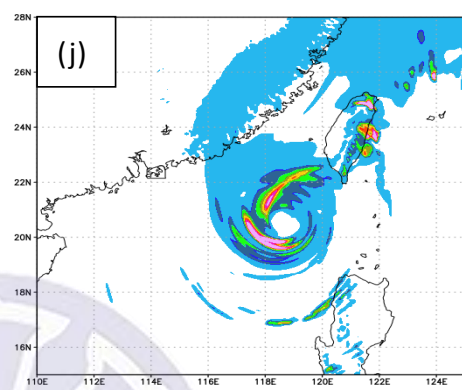
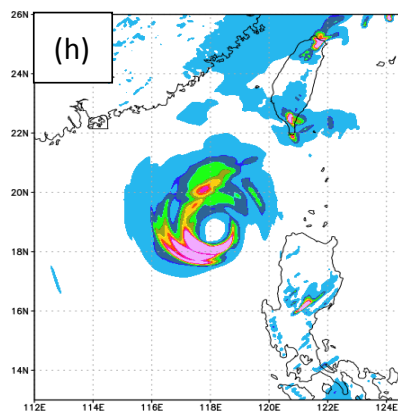
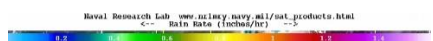
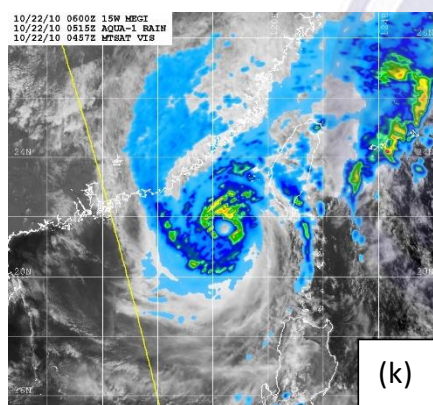
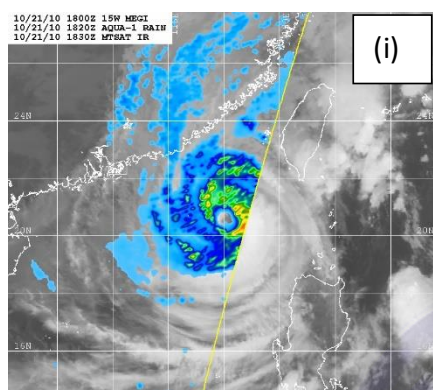
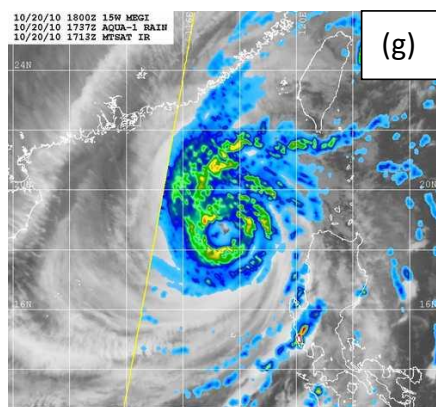


圖 4.4 完。

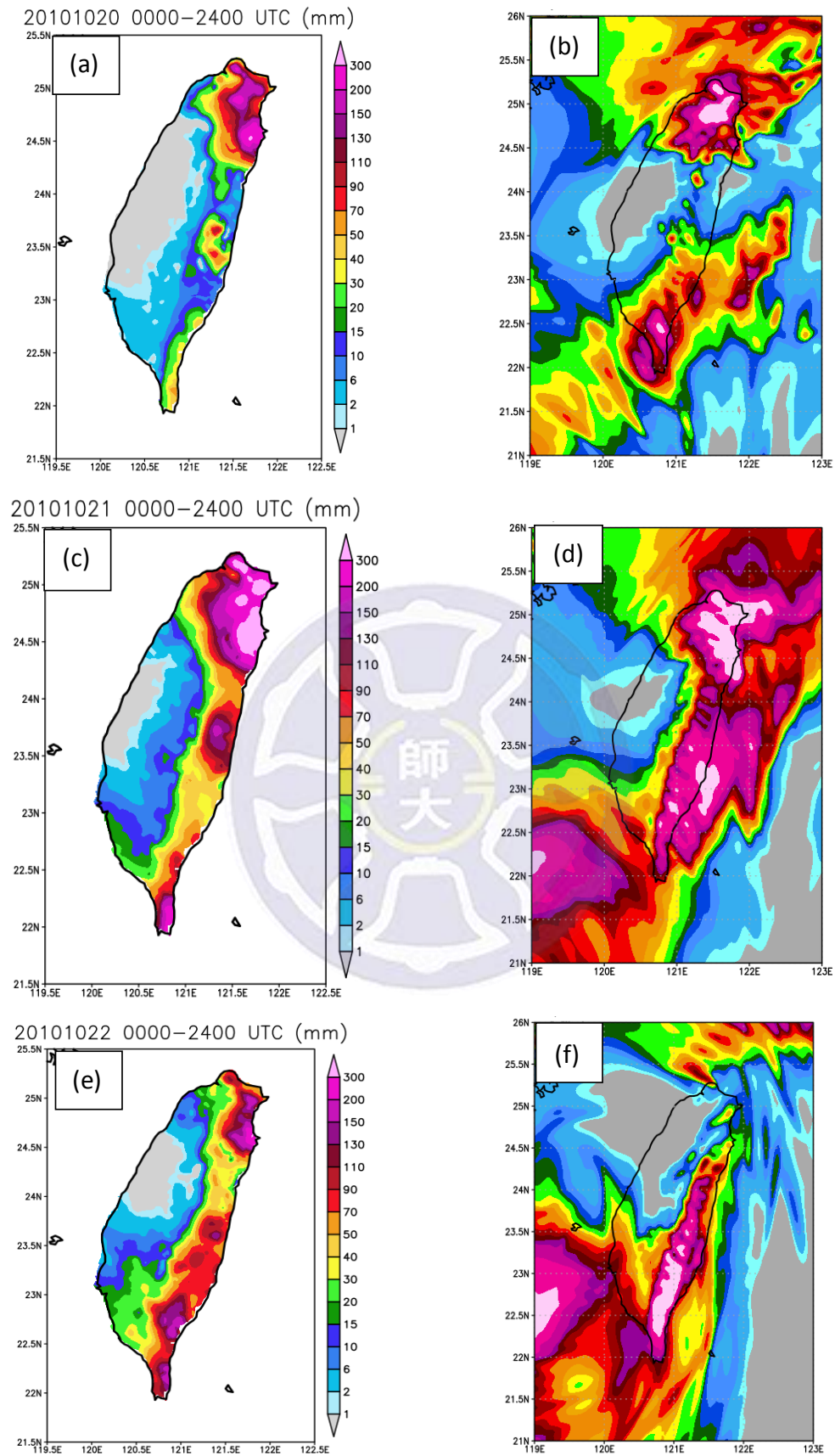


圖 4.5。(a)(c)(e)為中央氣象局 2010 年 10 月 20 日到 22 日 24 小時累積降雨圖。(b)(d)(f)為 ME1 模擬結果的 24 小時累積降雨圖。左右色階相同，單位皆為 mm

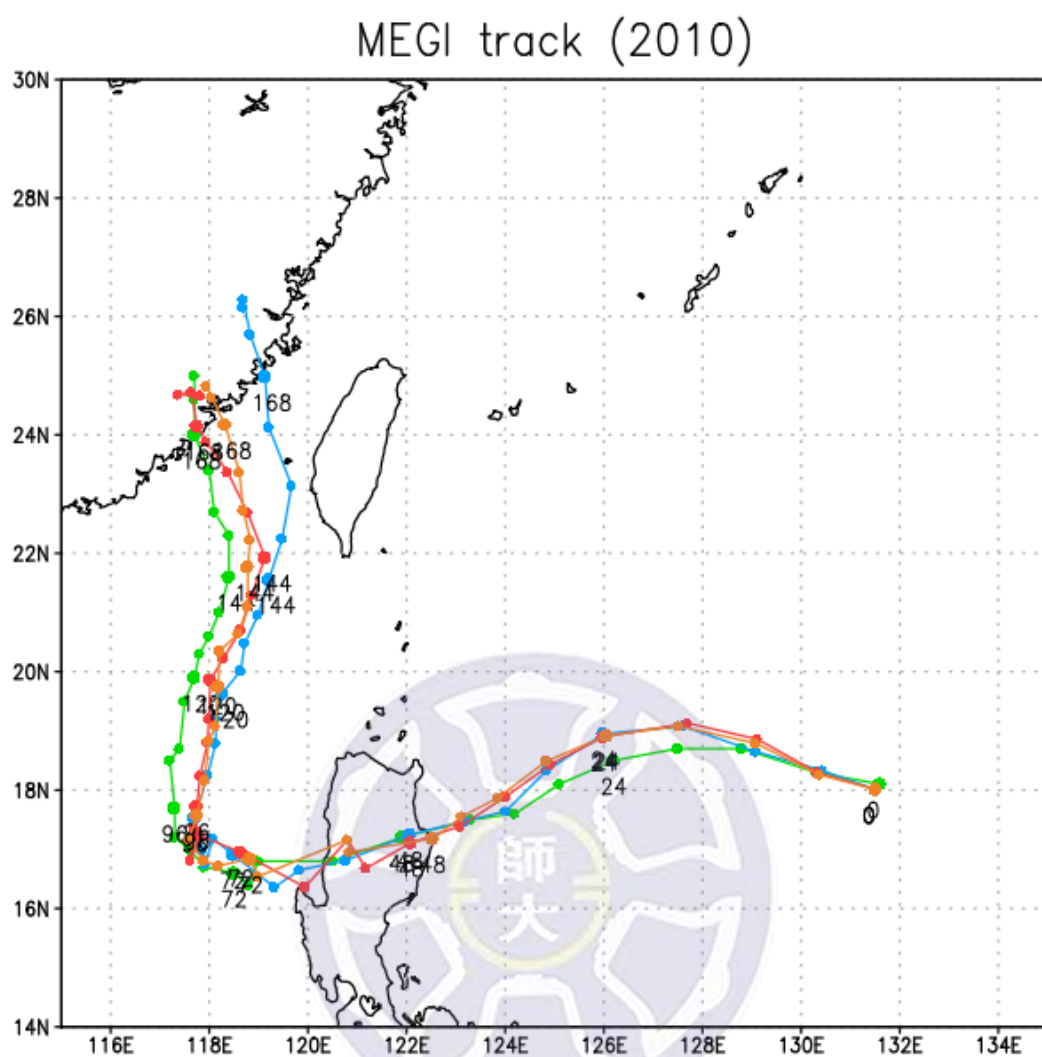


圖 4.6。為梅姬颱風之觀測和模擬路徑圖。綠色為 CWB 路徑，藍色為 ME1 路徑，橘色為 ME2 路徑，紅色為 ME3 路徑。每 6 小時一筆，模擬 24 小時標記數字。初始時間為 10 月 16 日 0600 UTC。

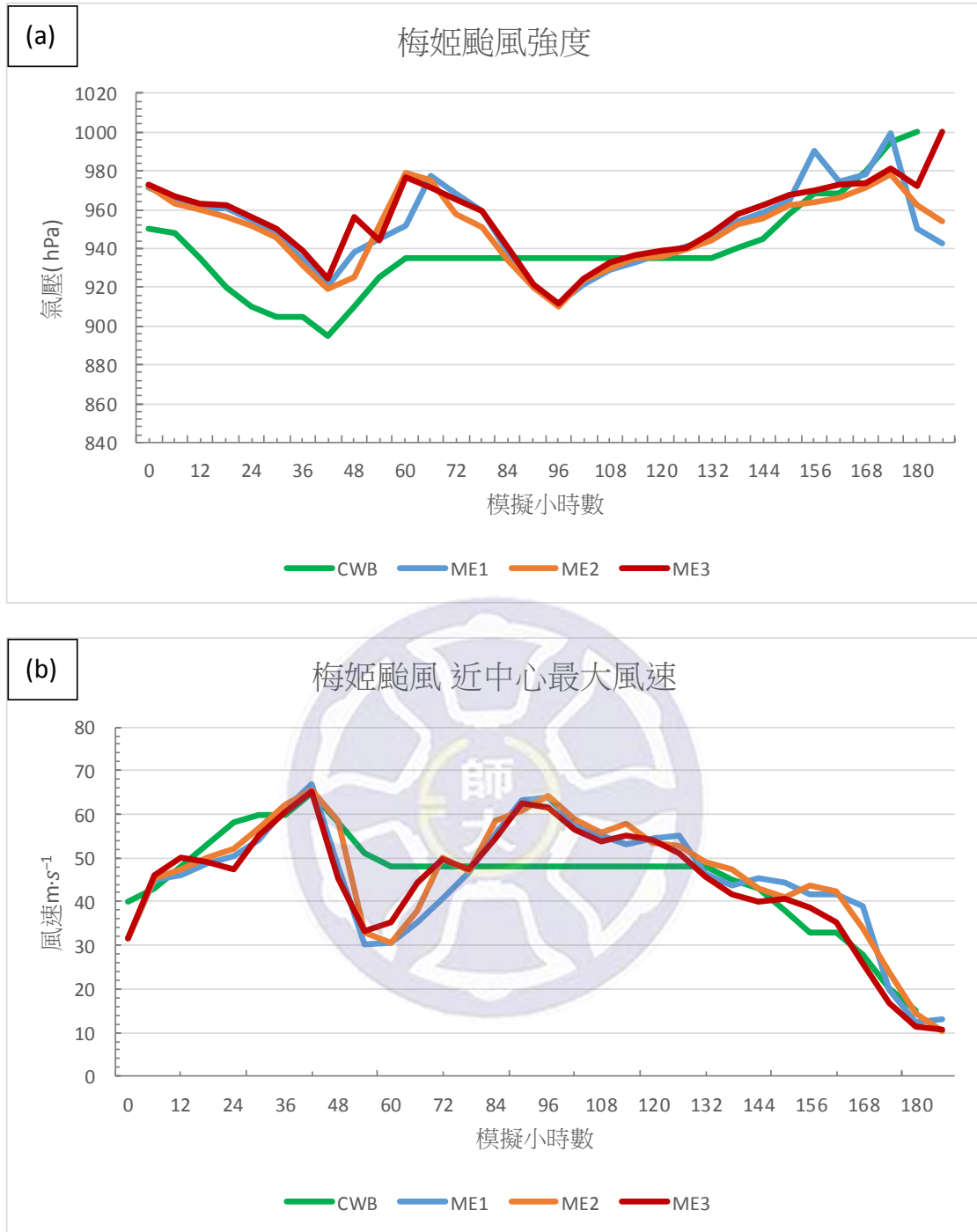
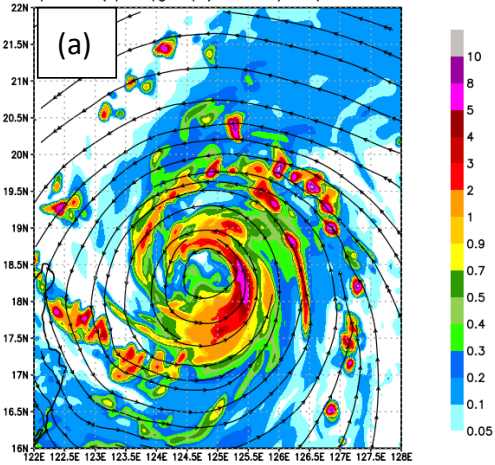
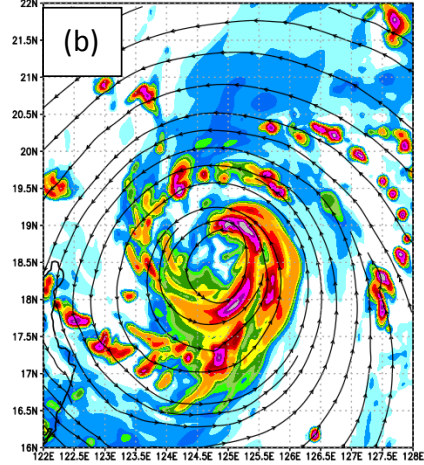


圖 4.7。為模擬 ME1、ME2、ME3 和 CWB 觀測資料之中心氣壓 (hPa) 和近中心最大風速， (ms^{-1}) 比較圖。

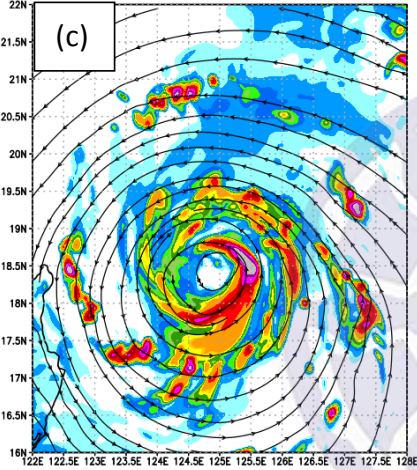
ME1 q3max(qr+qg+qs) 2010/10/17 1200UTC



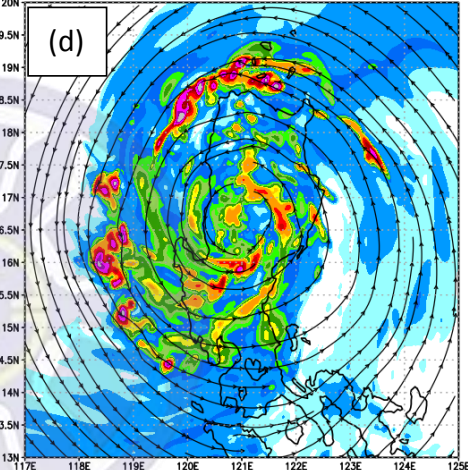
ME2 q3max(qr+qg+qs) 2010/10/17 1200UTC



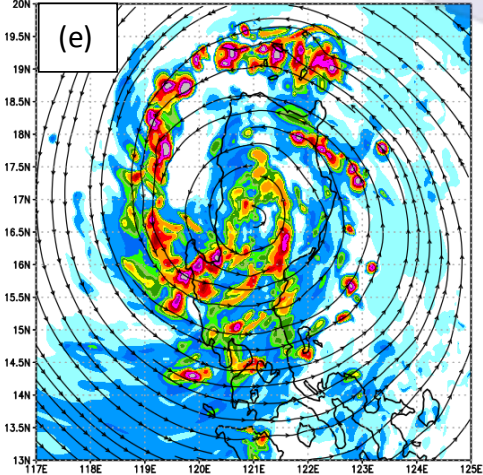
ME3 q3max(qr+qg+qs) 2010/10/17 1200UTC



ME1 q3max(qr+qg+qs) 2010/10/18 1200UTC



ME2 q3max(qr+qg+qs) 2010/10/18 1200UTC



ME3 q3max(qr+qg+qs) 2010/10/18 1200UTC

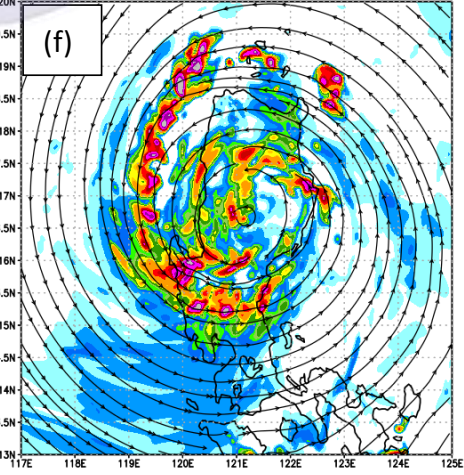


圖 4.8 待續。為梅姬颱風之 10 月 17 日 1200 UTC：(a)(b)(c)，分別為 ME1、ME2、ME3 依此順序類推；10 月 18 日 1200 UTC：(d)(e)(f)；10 月 19 日 1200 UTC：(g)(h)(i)；10 月 20 日 1200 UTC：(j)(k)(l)的 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和比於垂直方向加總。單位為 (g/kg)

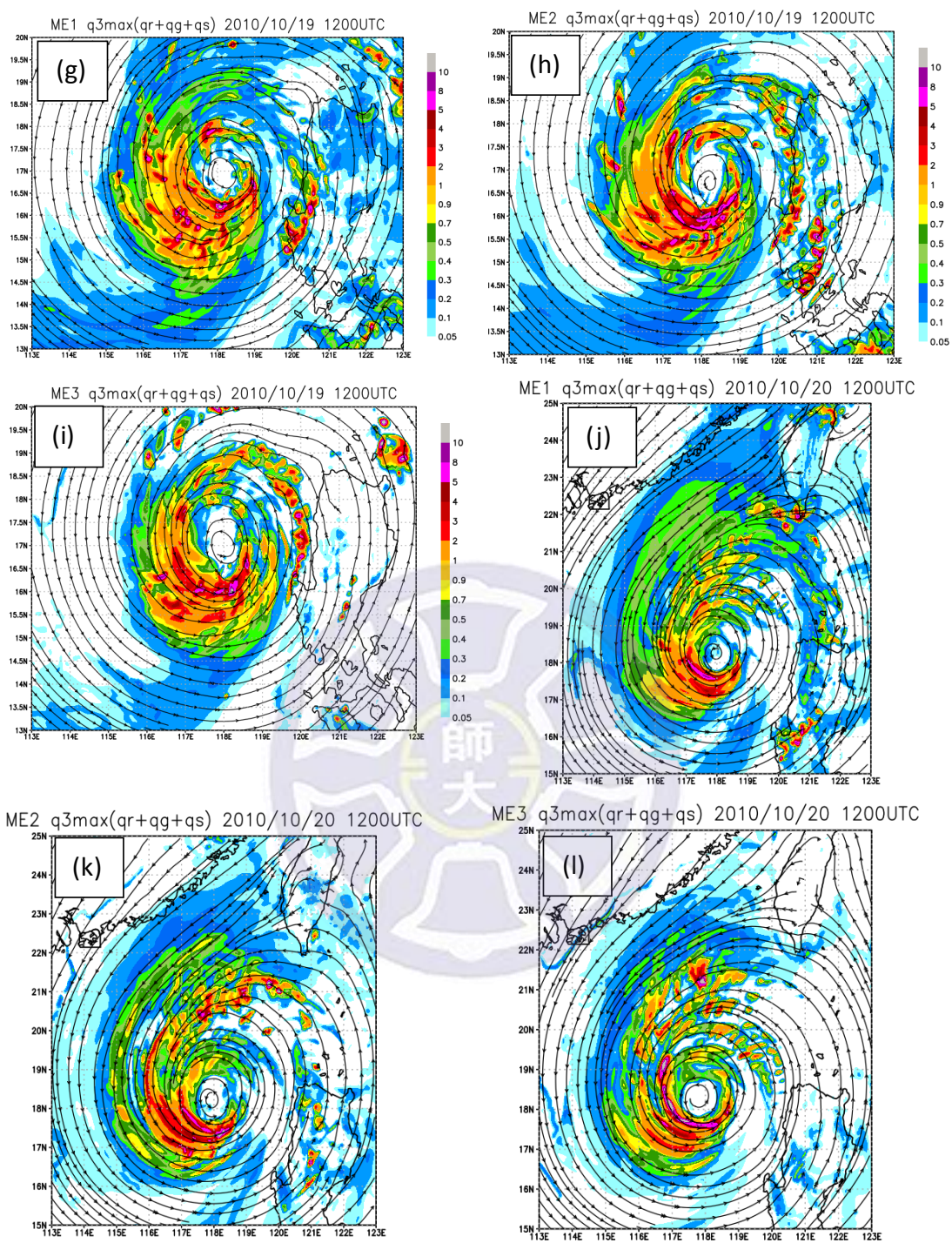


圖 4.8 完。

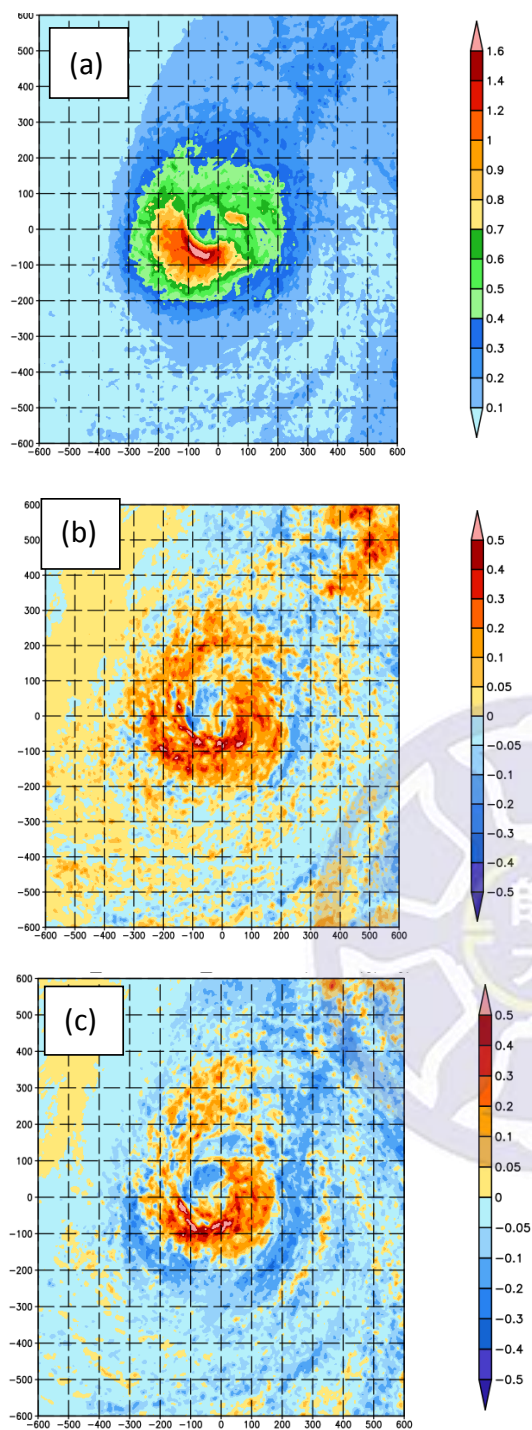


圖 4.9。為梅姬颱風生命週期(10 月 16 日 0600 UTC 到 24 日 0000 UTC，共 186 小時)之降水粒子(雨、雪、雹)之(a)ME1 混合比(b)ME2-ME1 之混合差異比(c)ME3-ME1 之混合差異比。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)

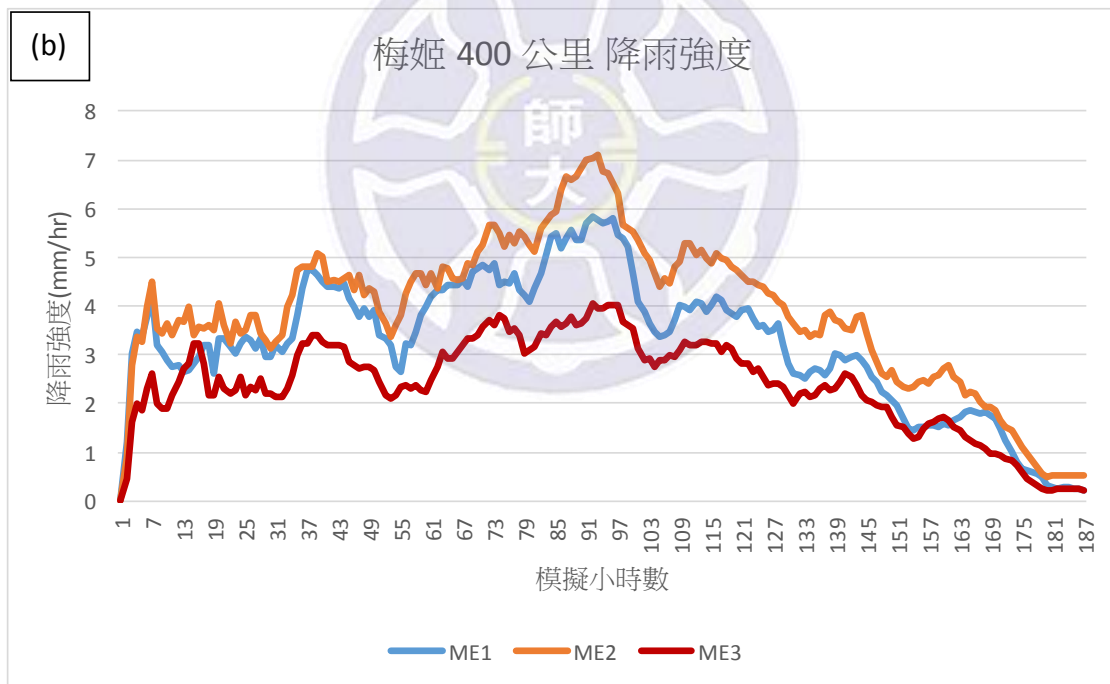
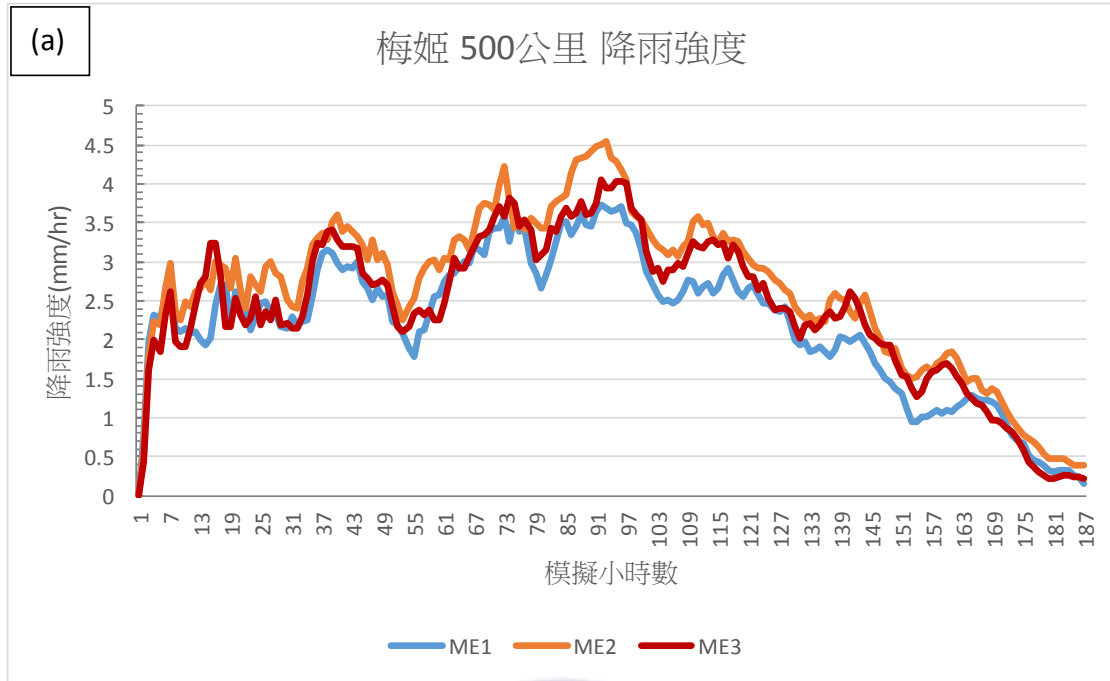


圖 4.10。為梅姬颱風在 500、400、300、200 半徑內取格點平均的逐時降雨強度比較圖。藍色為 ME1、橘色為 ME2、紅色為 ME3。

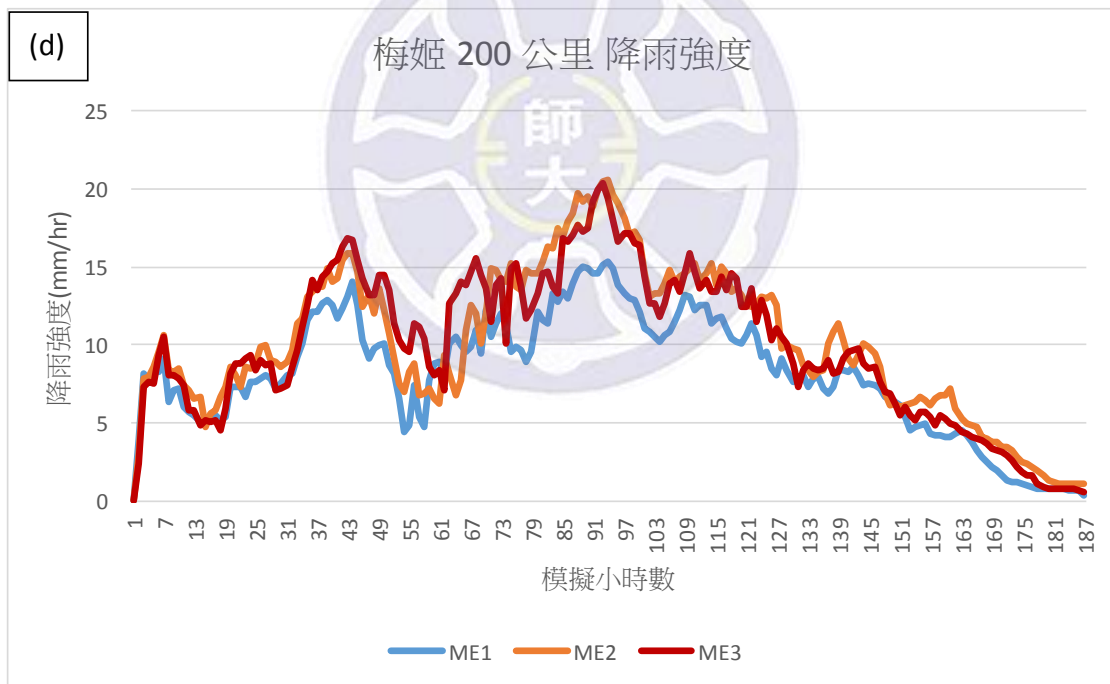
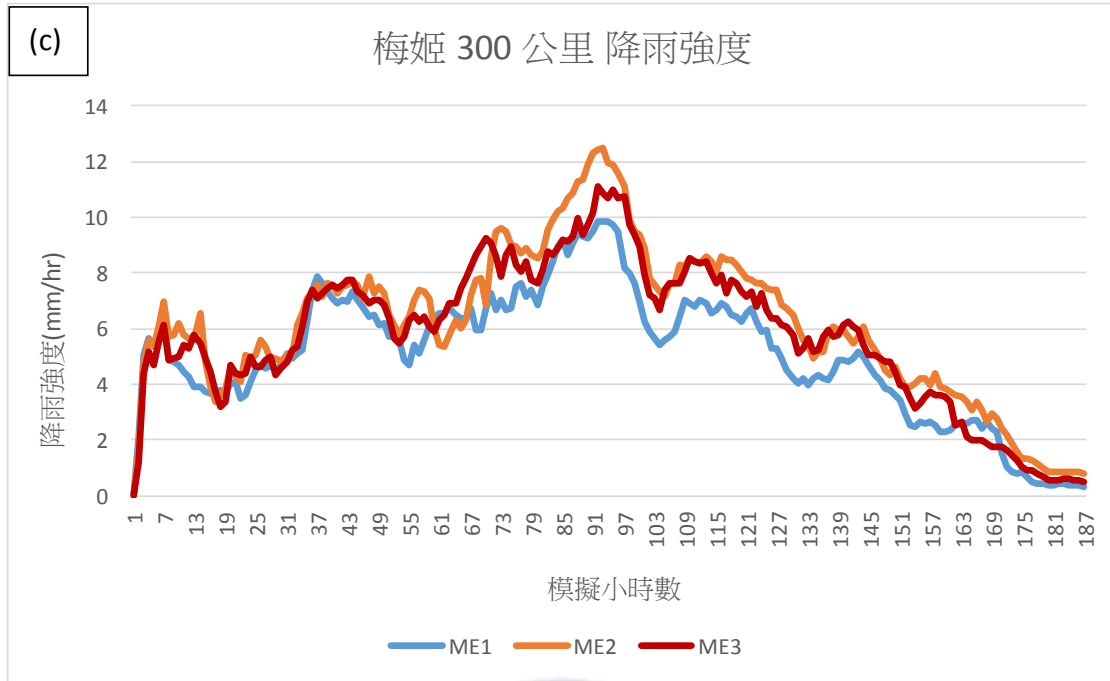


圖 4.10 完。

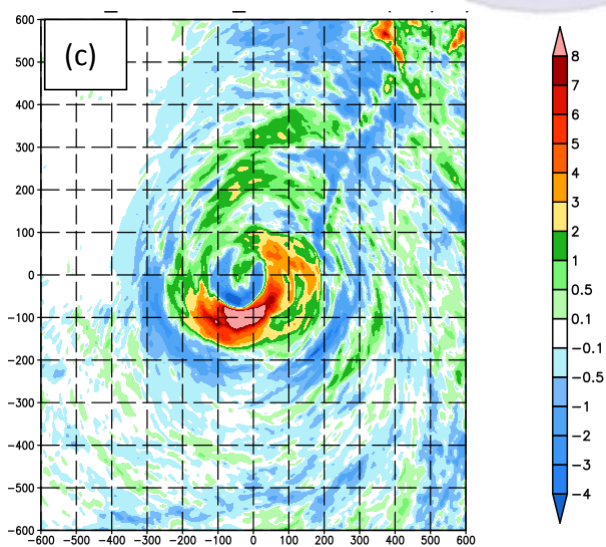
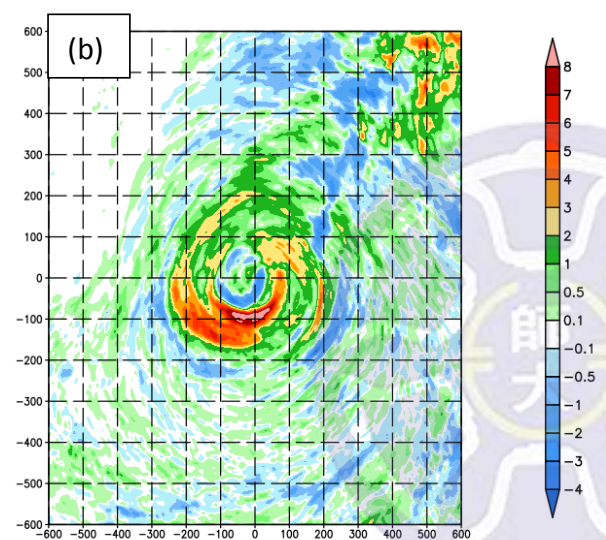
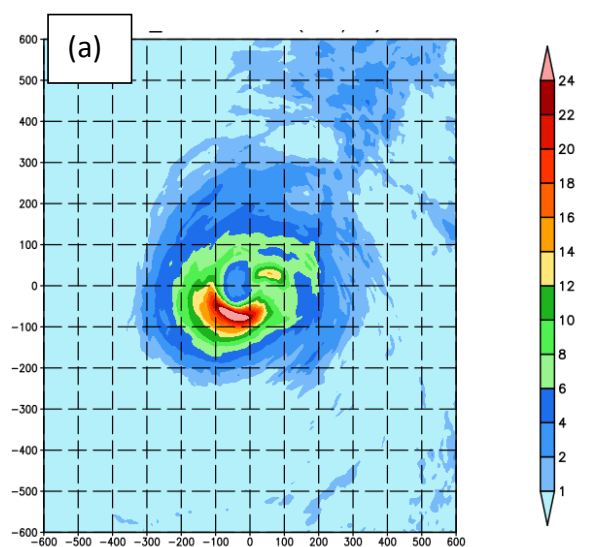


圖 4.11 為梅姬颱風生命週期(10 月 16 日 0600 UTC 到 24 日 0000 UTC，共 186 小時)之降雨強度，單位 mmhr^{-1} (a)ME1(b)ME2-ME1 之降雨強度差異(c)ME3-ME1 之降雨強度差異。X，Y 軸為

離中心點的距離(單位：公里)

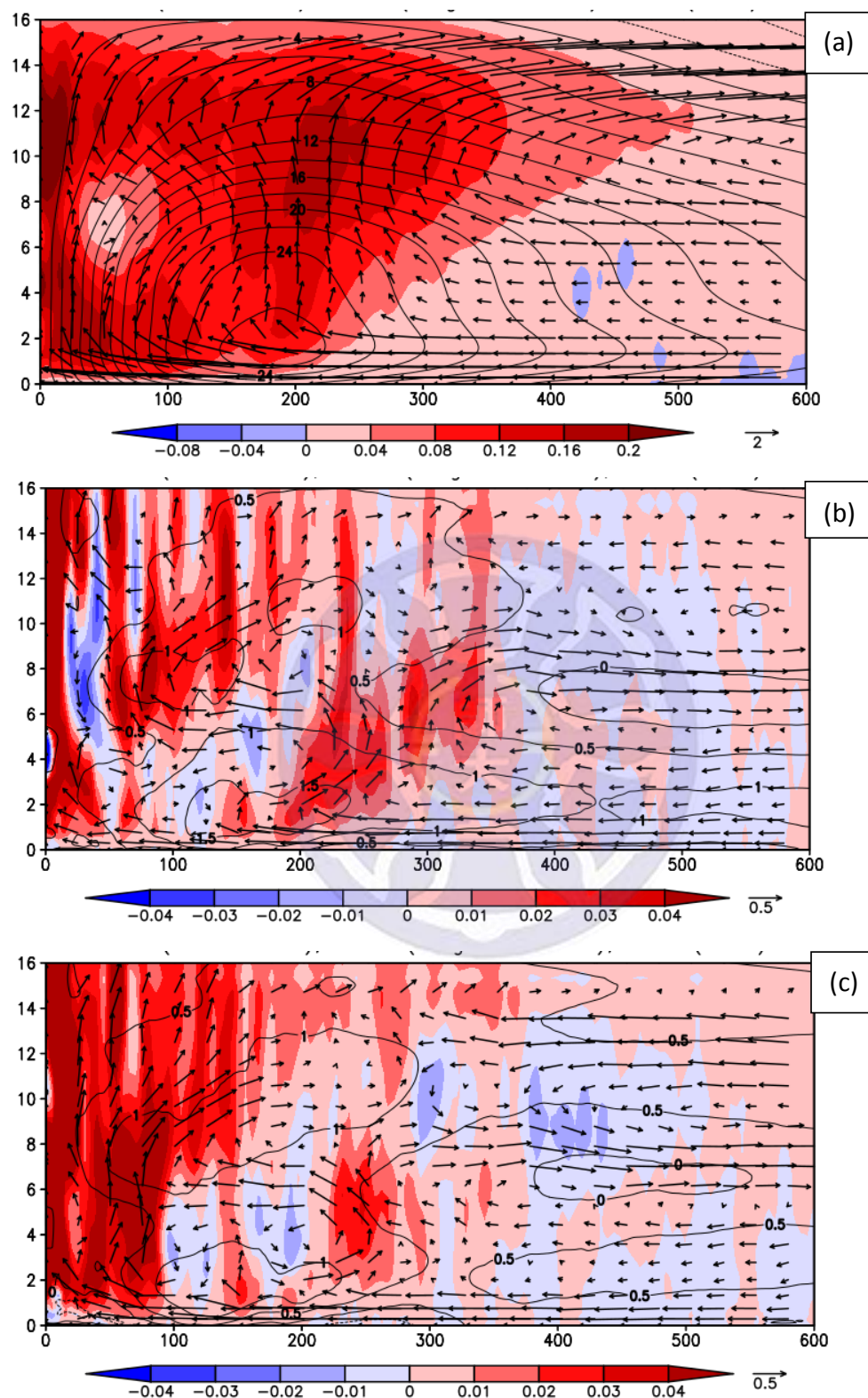


圖 4.12 為梅姬颱風 10 月 17 日 0600 UTC 到 22 日 0000 UTC 之軸對稱圖。X 軸為到颱風中心點的距離，Y 軸為到地表的距離，單位為公里。參數為：平均切向風($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)，等值線標示，(a)間距為 2；(b)(c)間距為 0.5)、垂直分量(色階，單位為 10 ms^{-1})、環流(徑向風和垂直速度，為箭

頭標示)。(a)為 TA1(b)TA2-TA1(c)TA3-TA1。

2010101800-102300 UTC (mm)

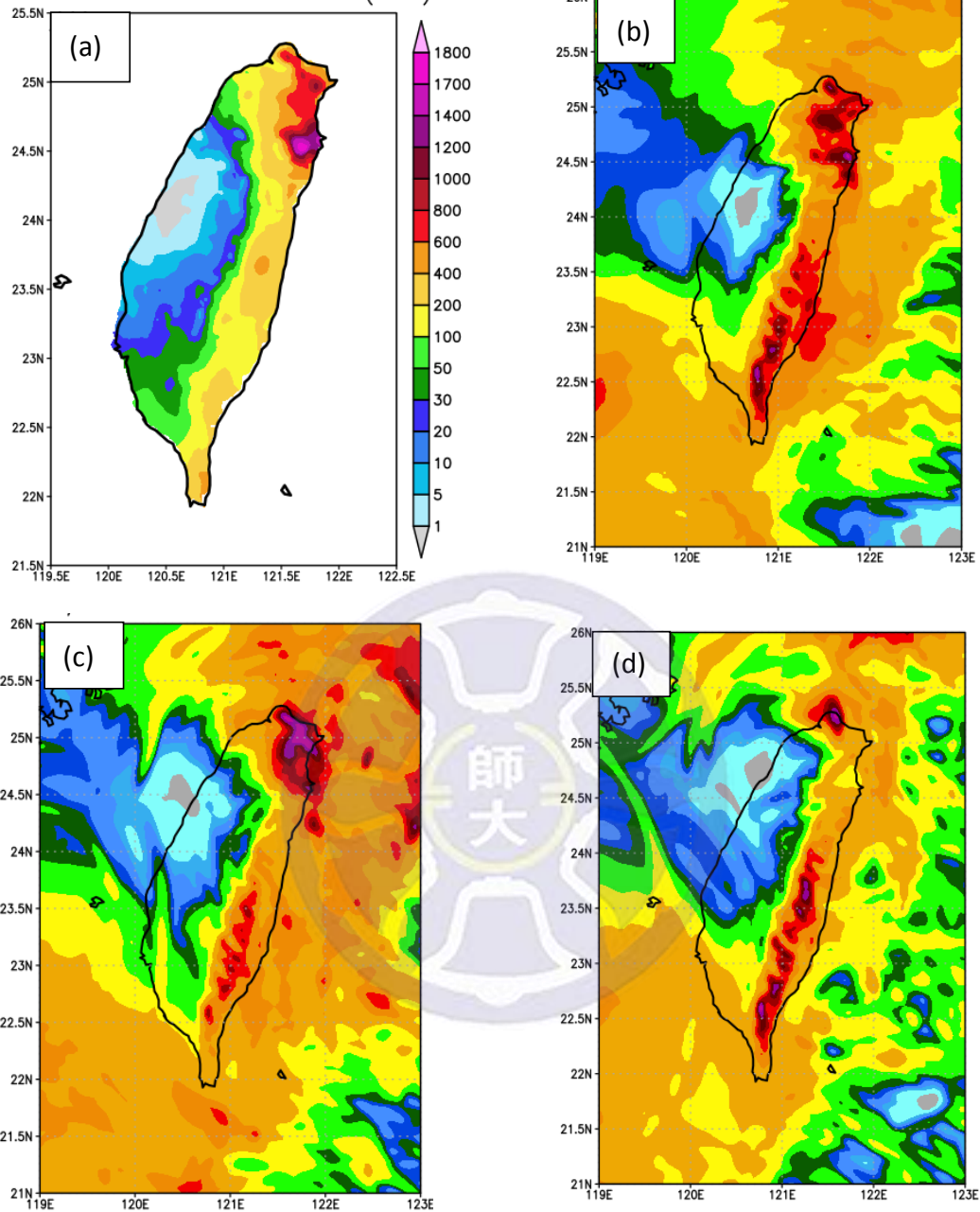


圖 4.13 為 10 月 18 日 0000 UTC 到 10 月 23 日 0000 UTC 之 5 天累積雨量圖。單位為 mm，4 張圖色階都相同。(a)CWB(b)ME1(c)ME2(d)ME3

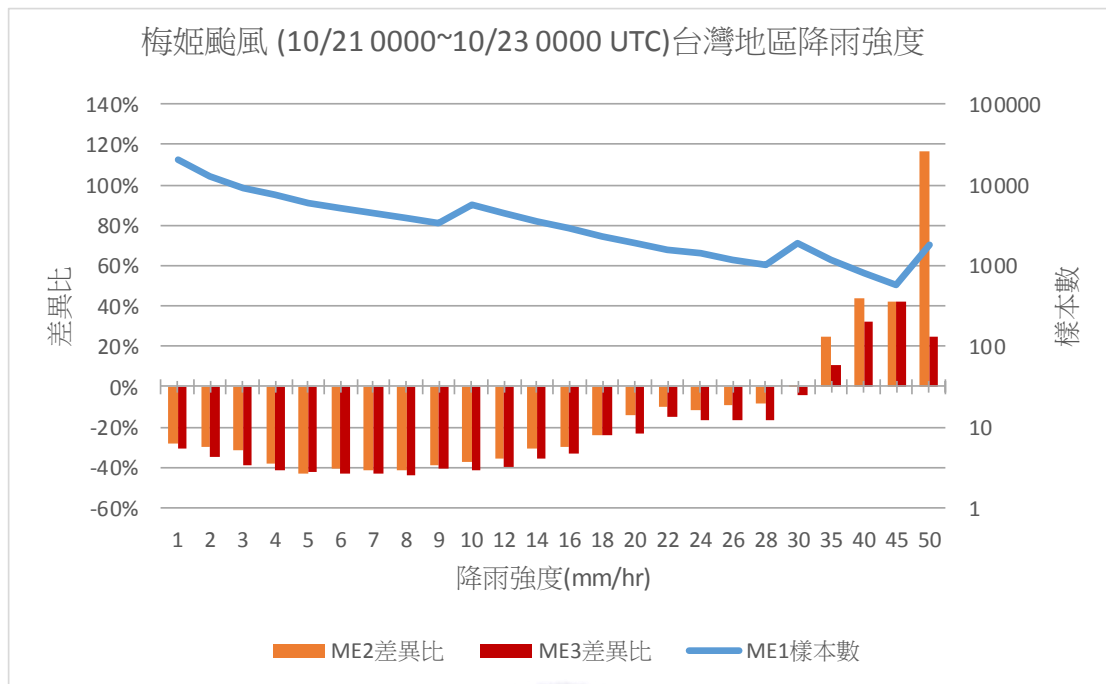


圖 4.14。2010 年 10 月 21 日 0000 UTC 到 23 日 0000 UTC 台灣地區降雨強度樣本數和差異比。每一個格點就是一個樣本。藍色線為 ME1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 ME2-ME1 的差異比，紅色為 ME3-ME1 的差異比，坐標軸為左方。

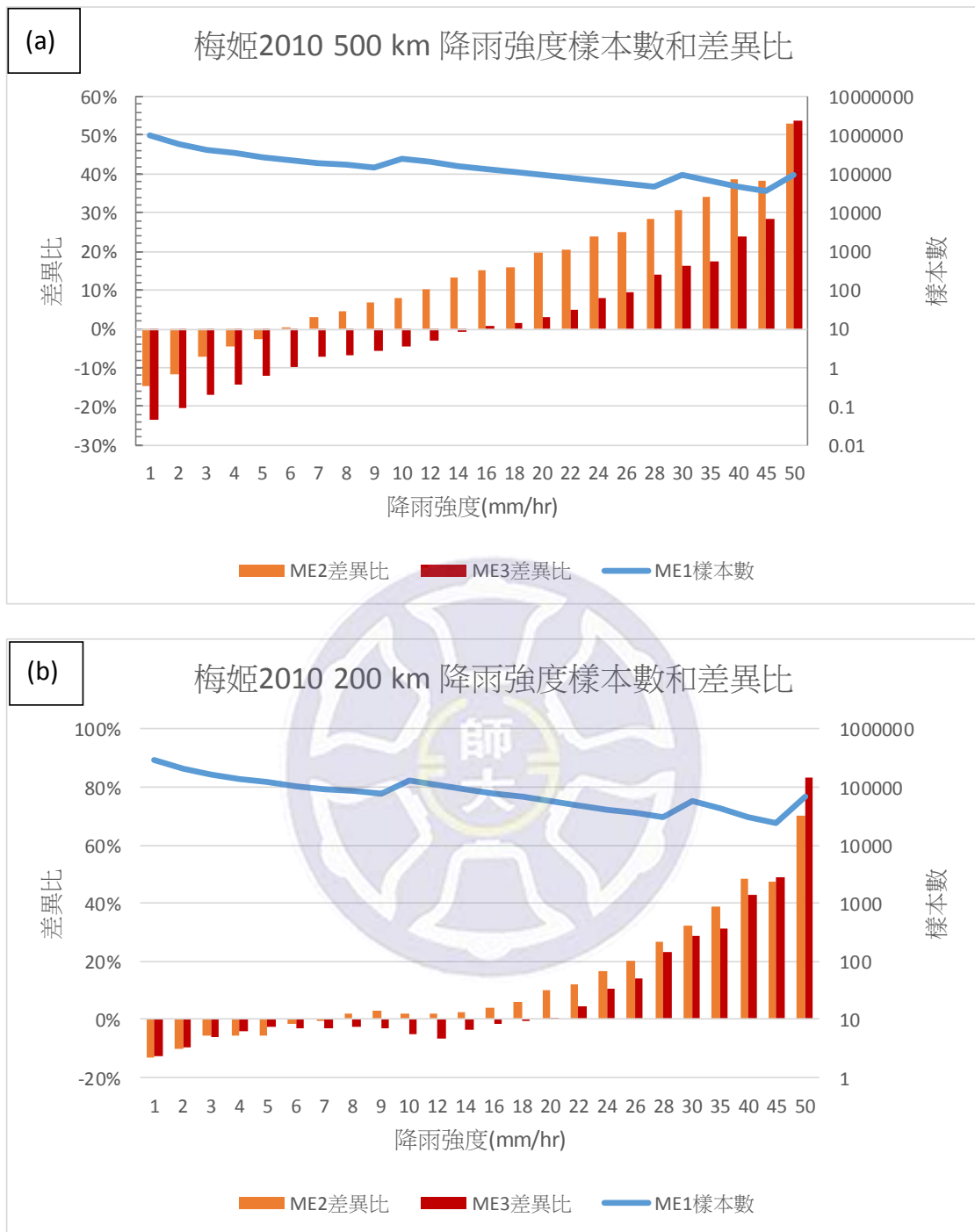


圖 4.15。為取 500 公里和 200 公里內的降水格點的比較圖。每一個格點就是一個樣本。藍色線為 ME1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 ME2-ME1 的差異比，紅色為 ME3-ME1 的差異比，坐標軸為左方。

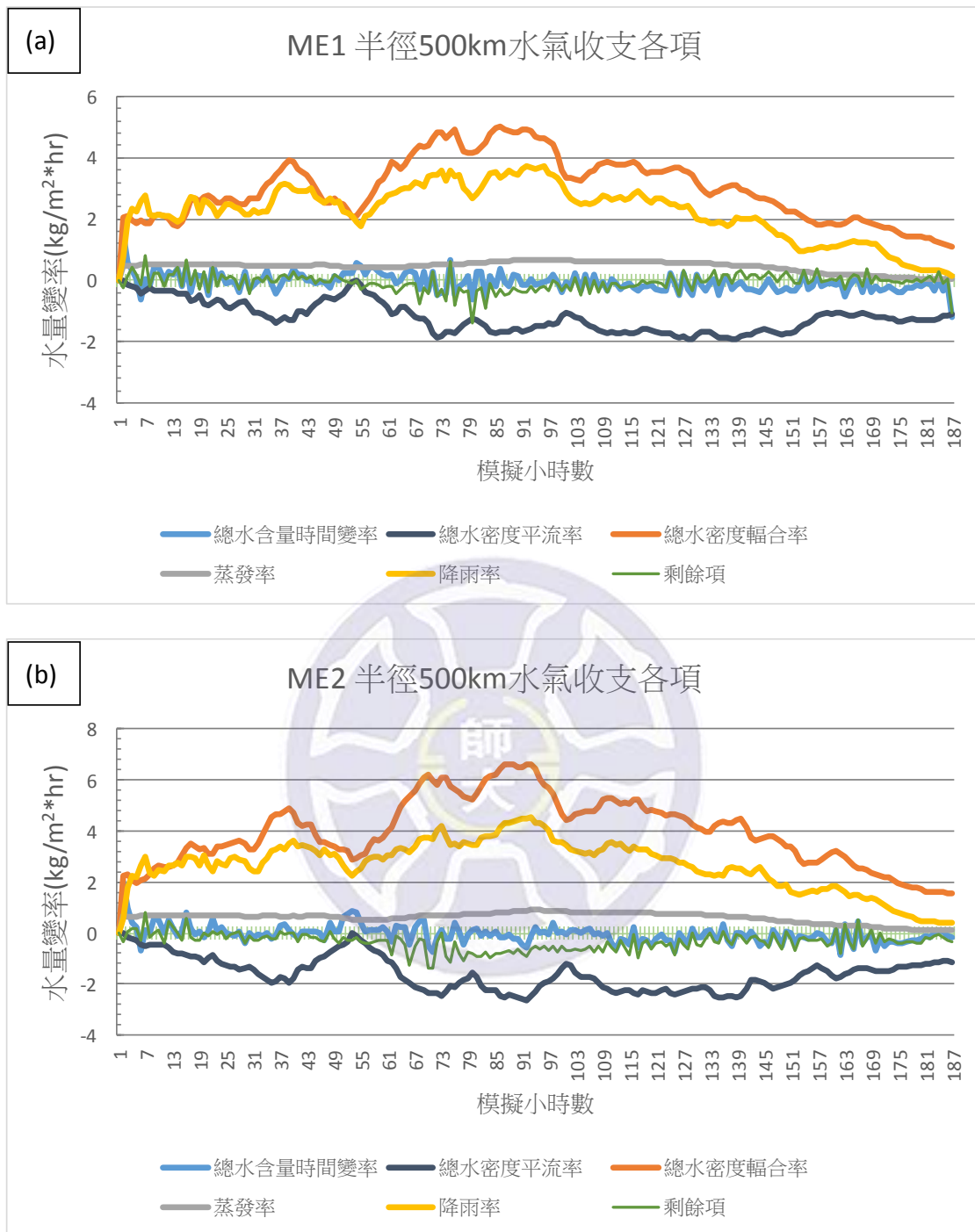


圖 4.16 半徑 500 公里內水氣收支各項逐時變化圖。(a)ME1(b)ME2(c)ME3。

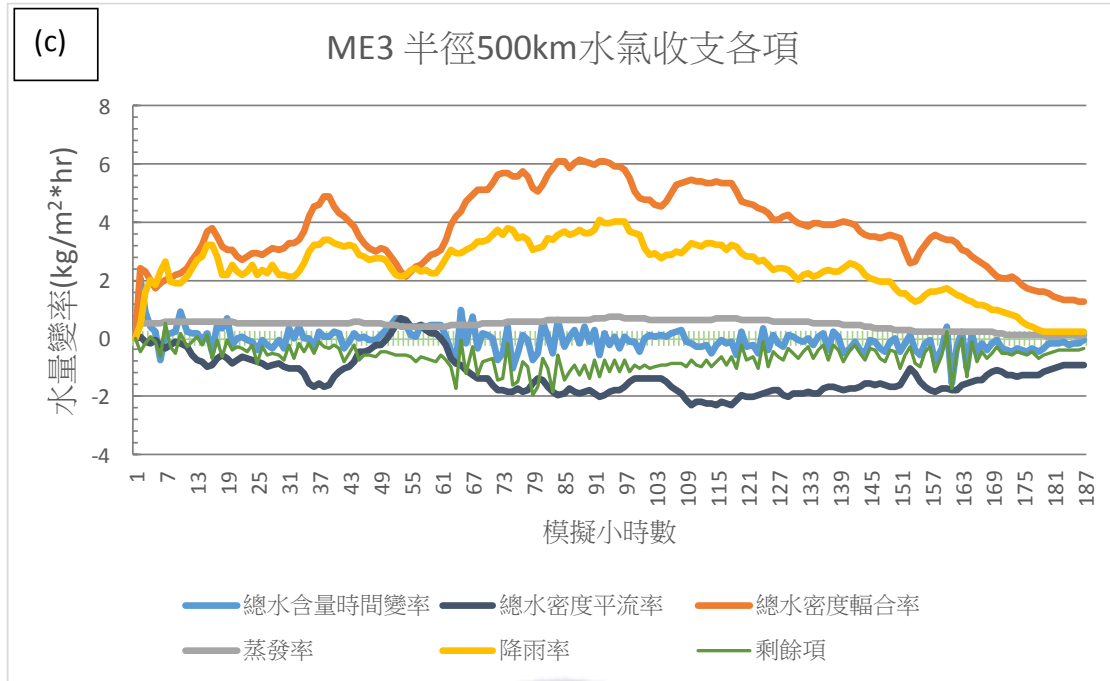


圖 4.16 完。

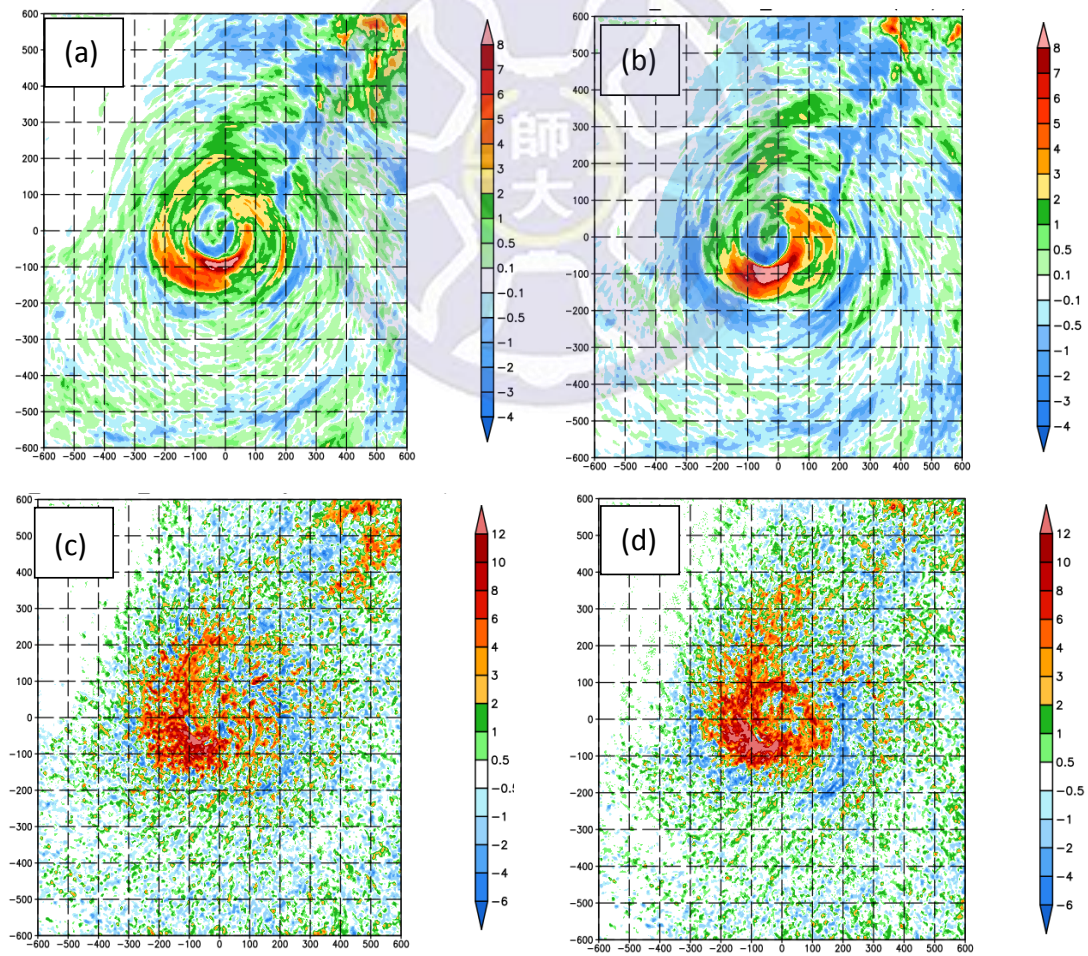


圖 4.17(a)(b)分別為 ME2-ME1 和 ME3-ME1 的降雨強度差異(單位 mmhr^{-1})，(c)(d)分別為 ME2-ME1 和 ME3-ME1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)。X，Y 軸為離中心點的距離

(單位：公里)

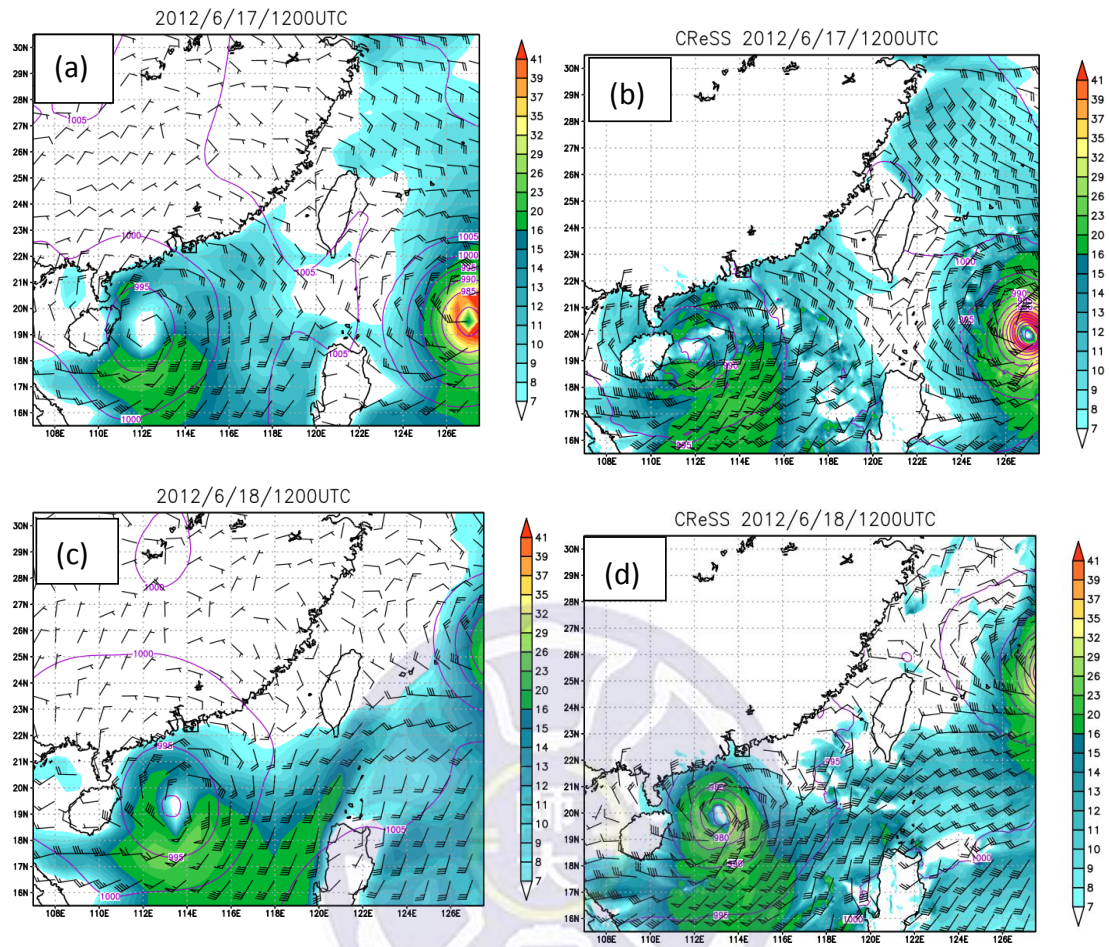


圖 5.1 待續。2012 年 6 月 17 日到 20 日之 1200 UTC，(a)(c)(e)(g)為 NCEP GFS 的 1000hPa 的風場(風標：每橫代表 10 ms⁻¹)、風速(色階：單位ms⁻¹)、海平面氣壓(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)以及對應到的(b)(d)(f)(h)(i)(l)為同一個時間的 CReSS，離地表 50m 高的風場(風標：每橫代表 10 ms⁻¹)、10 公尺高的風速(色階：單位ms⁻¹)，和氣壓場(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)。

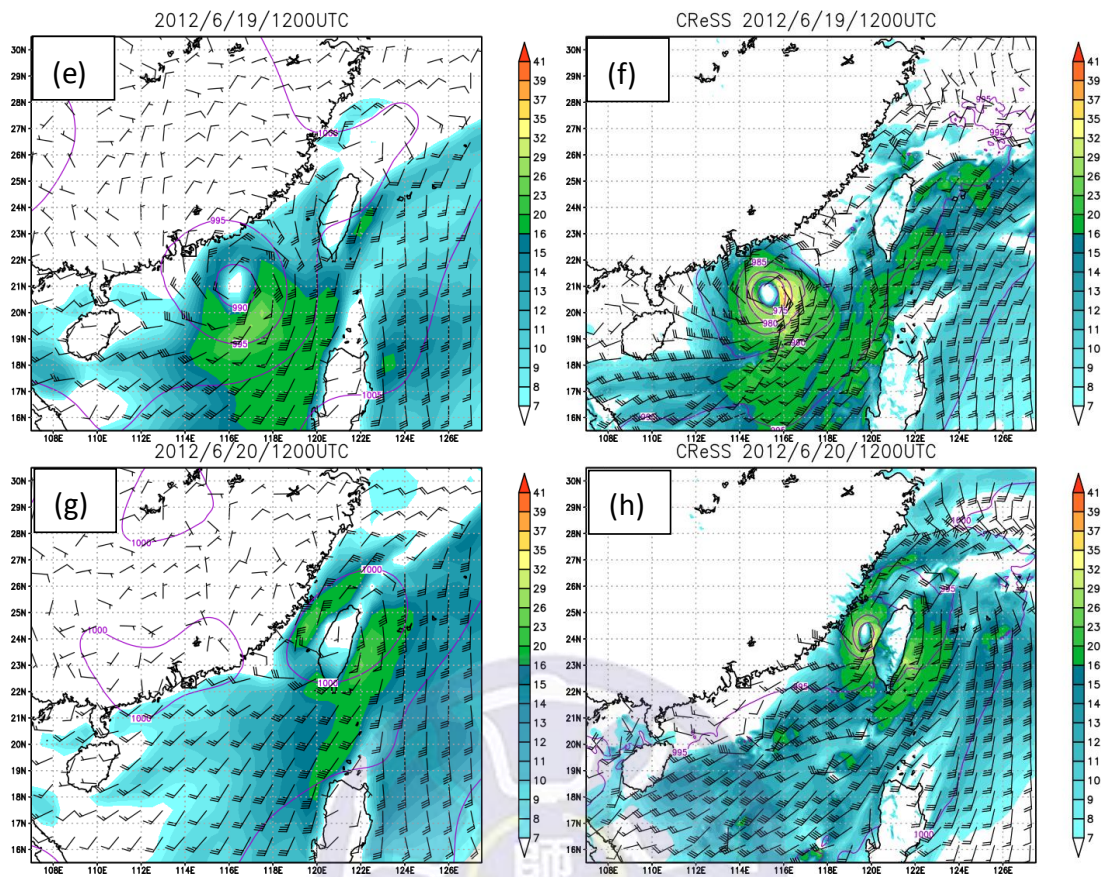


圖 5.1，完。

TALIM track CWB&CReSS(2012061700-2012062100)

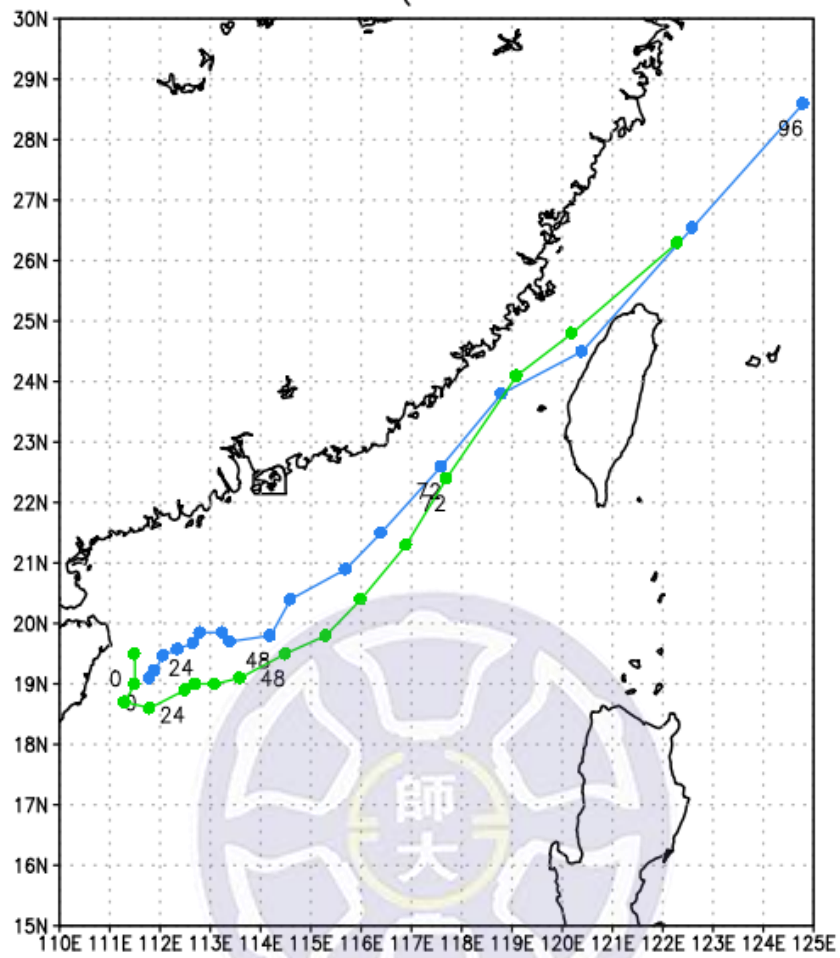


圖 5.2，為 TA1 模擬的路徑和 CWB 路徑比較圖，藍色為 TA1，綠色為 CWB 路徑。每 6 小時打點，每 24 小時標記一次。

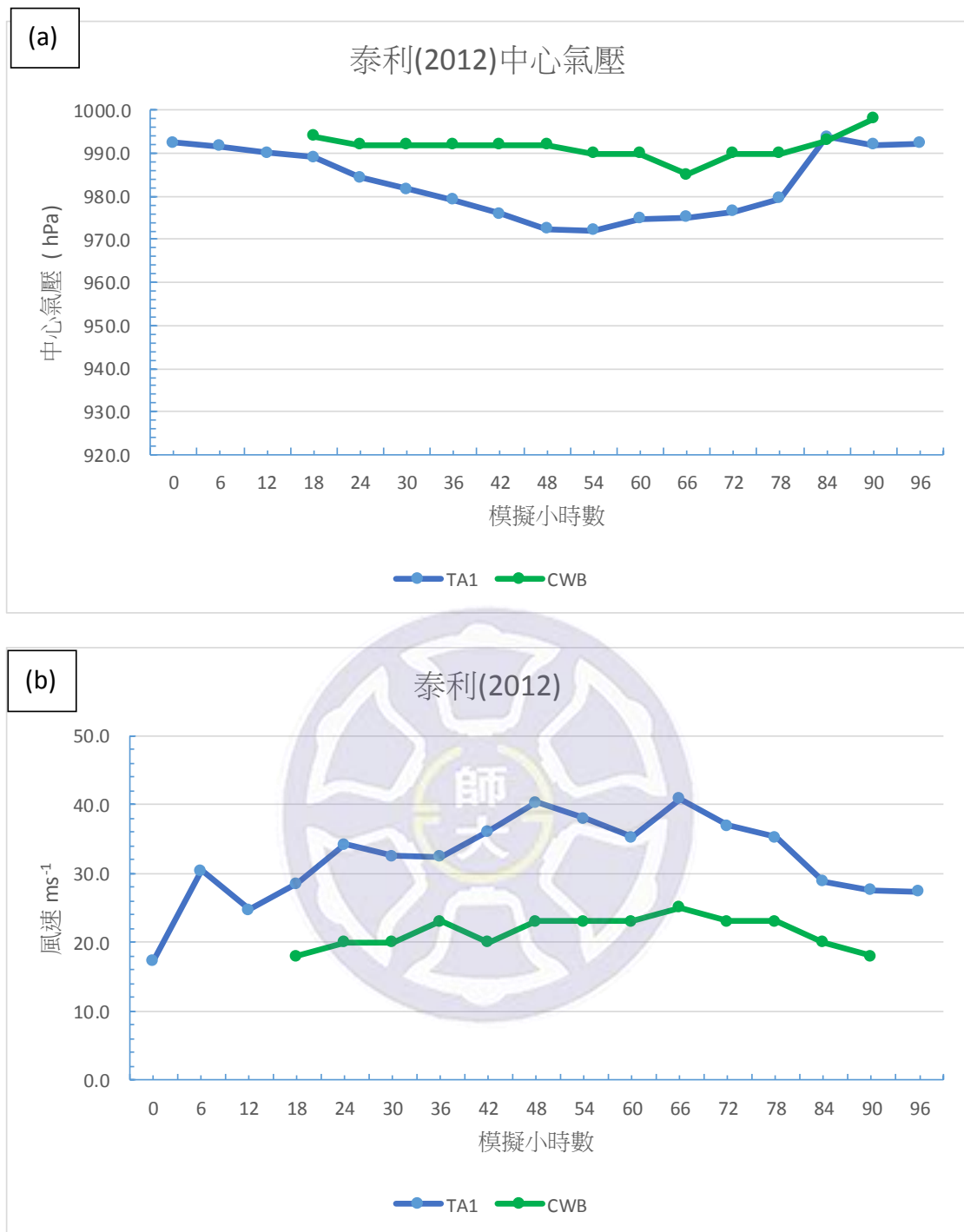


圖 5.3 為模擬 TA1 和 CWB 觀測資料之中心氣壓 (hPa)和近中心最大風速 ms^{-1} 比較圖

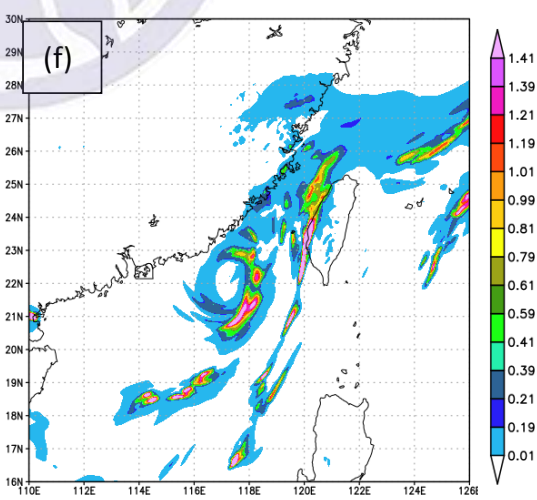
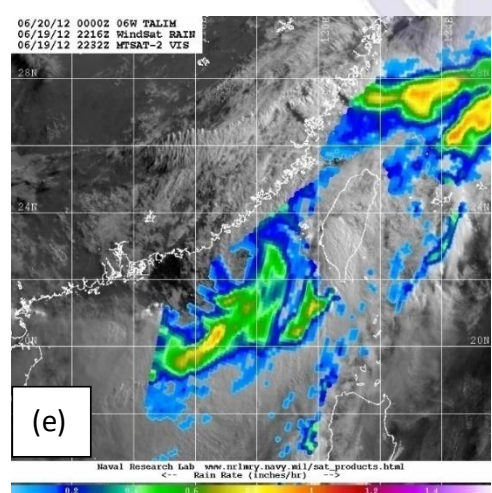
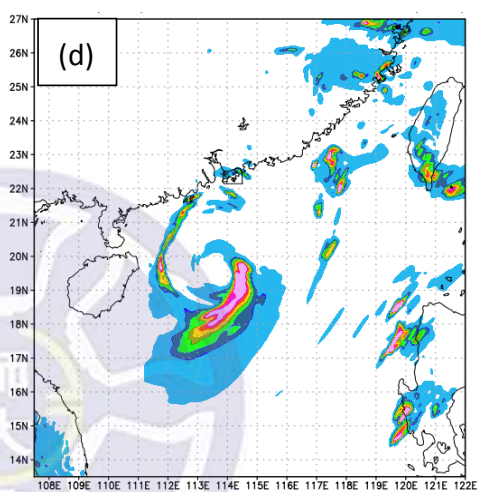
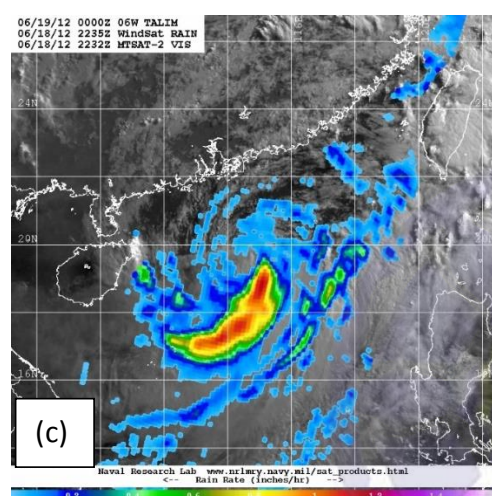
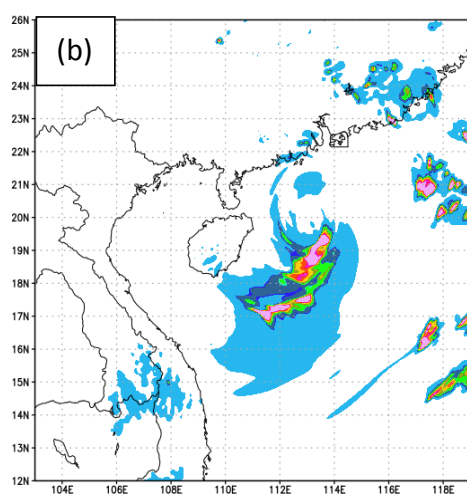
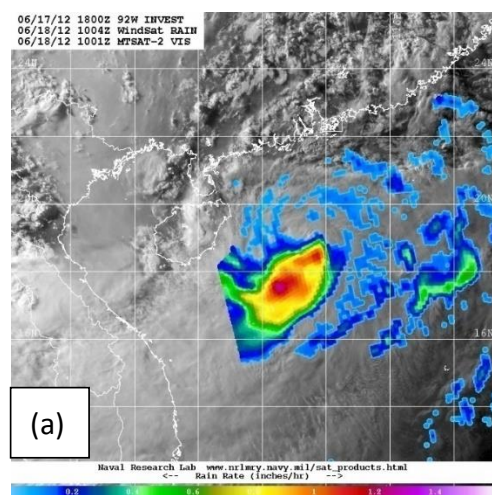


圖 5.4，(a)6/18 1004UTC(c) 6/18 2235UTC(e)6/19 2216UTC，為 NRL 衛星觀測資料，(b)(d)(f)為 TA1 模擬的資料，參數皆為降雨強度，單位為(inches/hr)。(a)(b)為相近時間，以此類推。

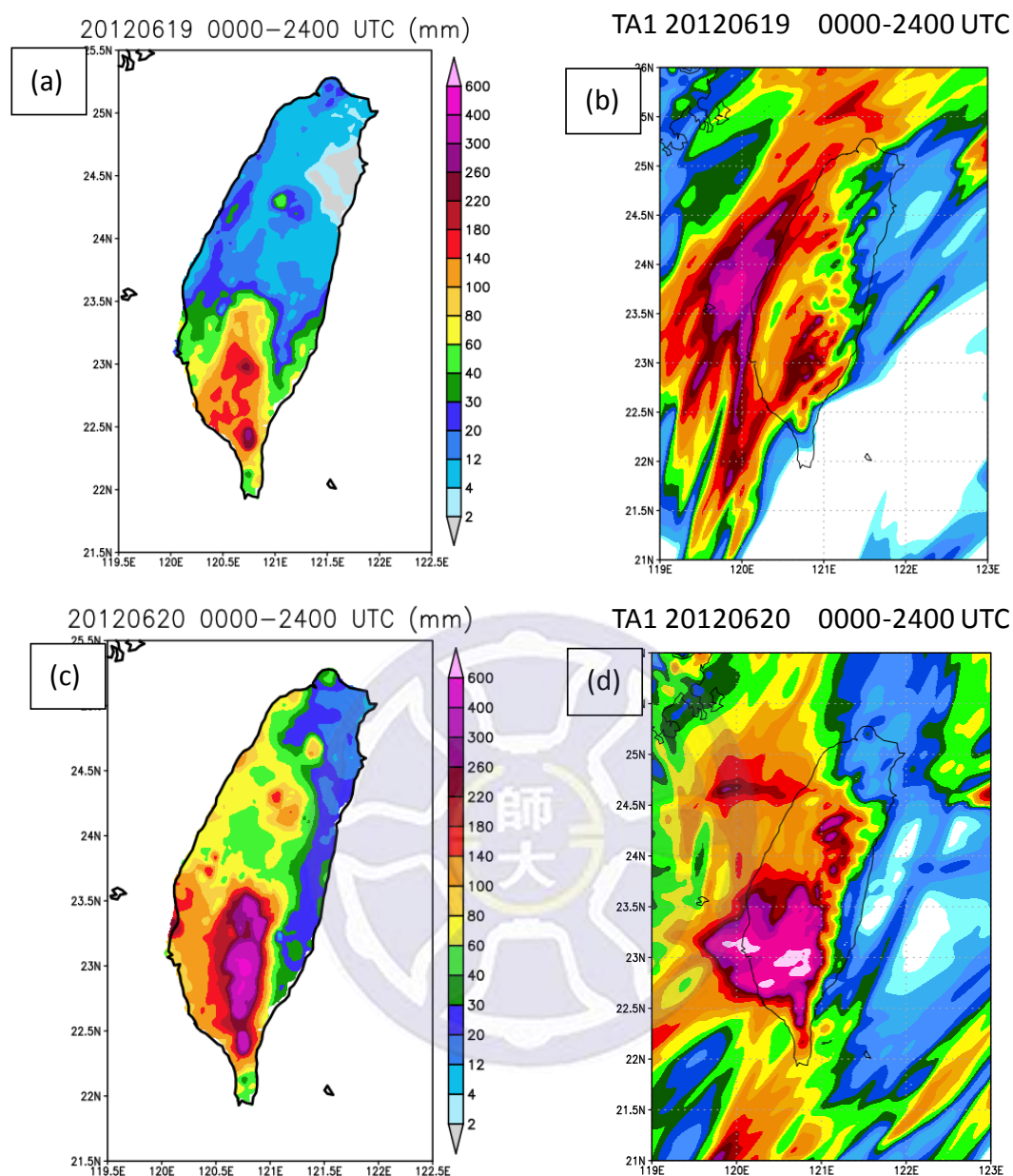


圖 5.5。(a)(c)為中央氣象局 2012 年 6 月 19 日和 20 日 24 小時累積降雨圖。(b)(d)為 TA1 模擬結果的 24 小時累積降雨圖。左右色階相同，單位皆為 mm。

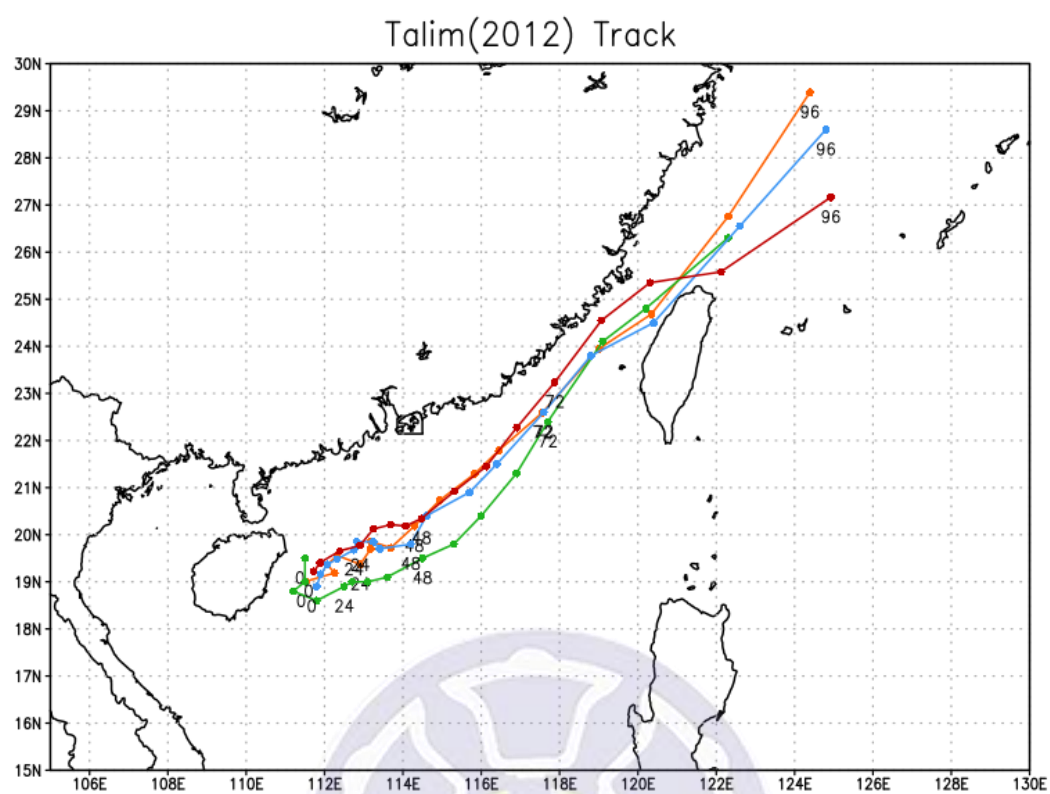


圖 5.6 為泰利颱風之觀測和模擬路徑圖。綠色為 CWB 路徑，藍色為 TA1 路徑，橘色為 TA2 路徑，紅色為 TA3 路徑。每 6 小時一筆，每 24 小時標記數字。

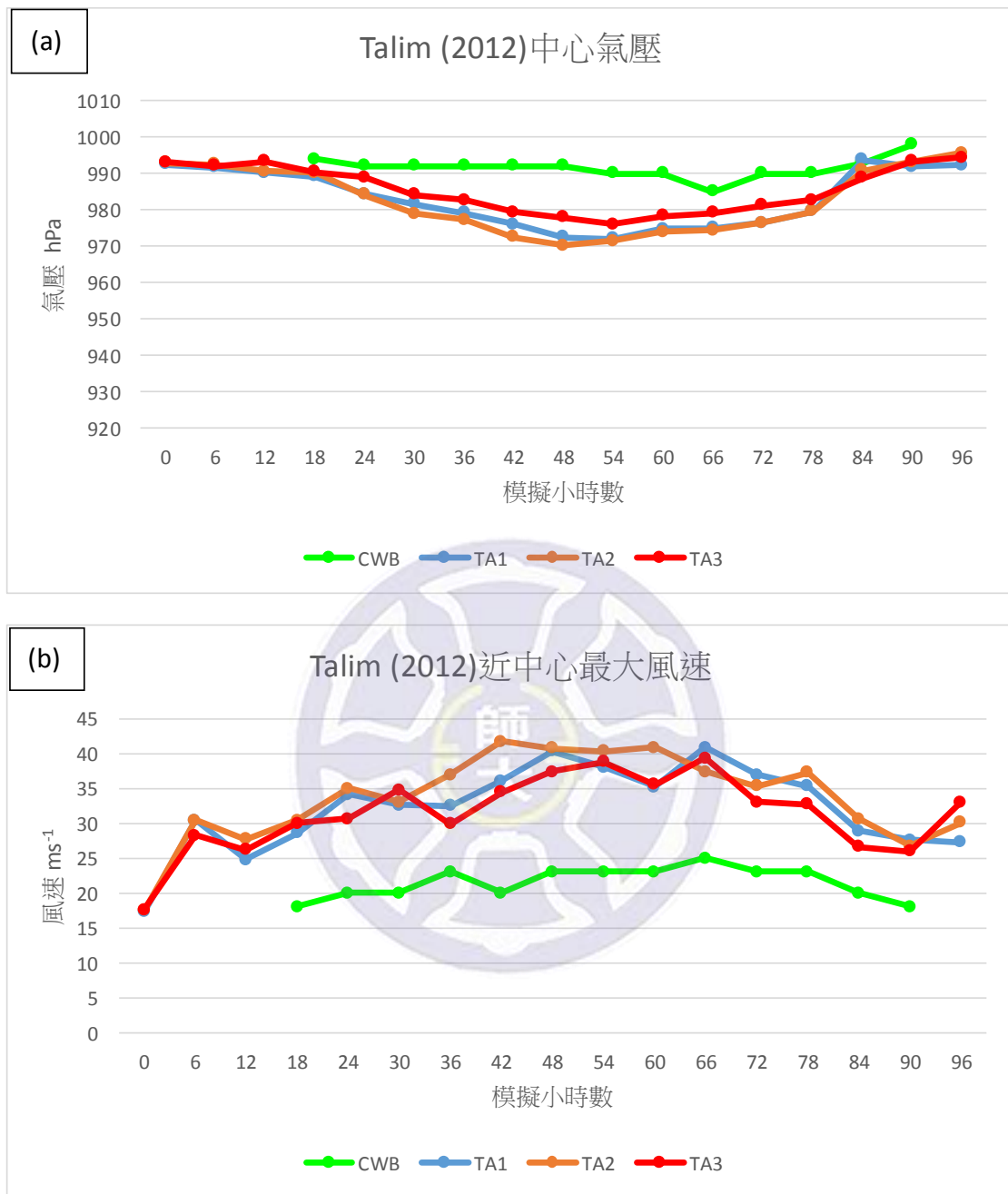


圖 5.7。為模擬 TA1、TA2、TA3 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速(ms^{-1})比較圖。

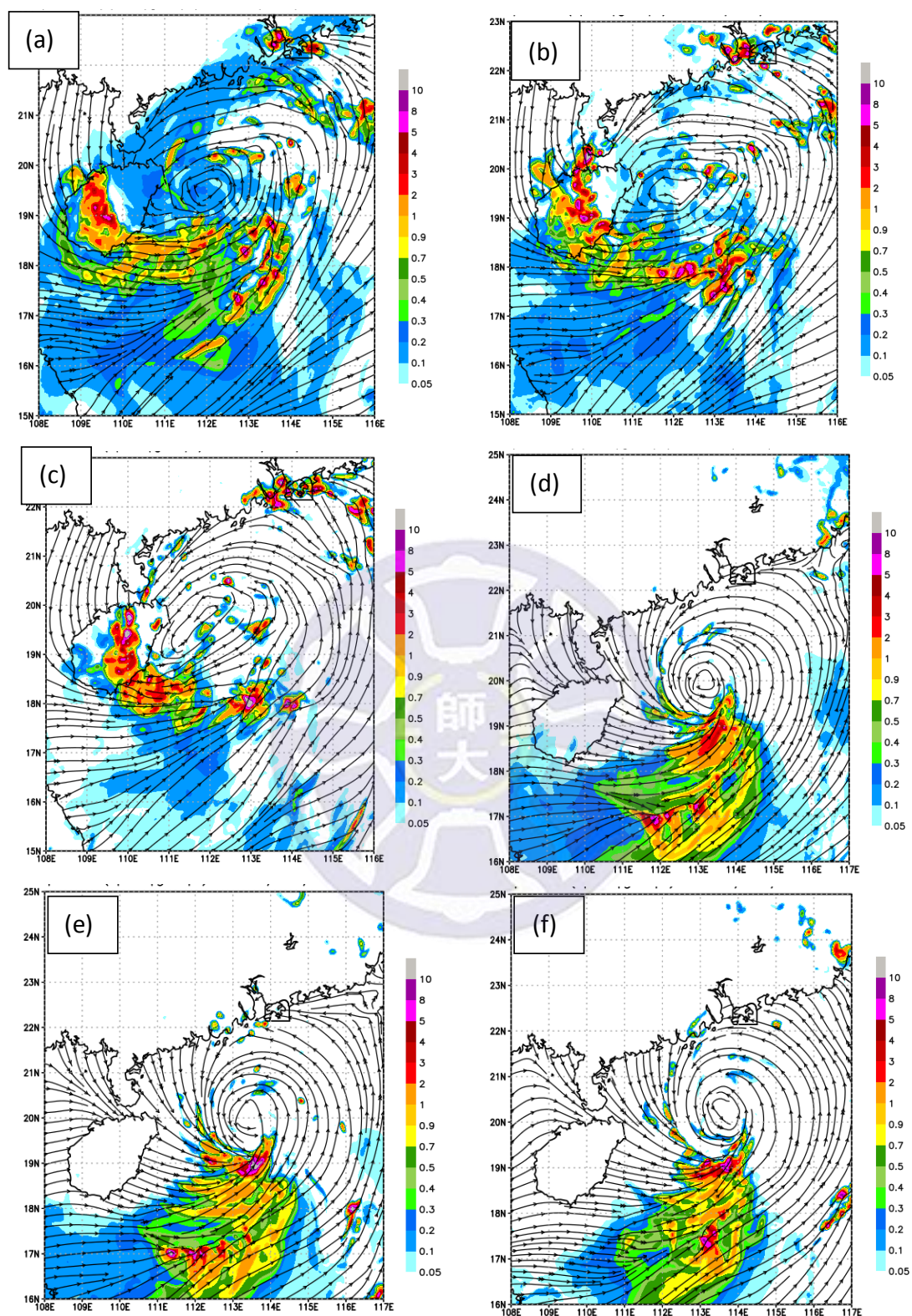


圖 5.8 待續。為泰利颱風之 6 月 17 日 1200 UTC：(a)(b)(c)，分別為 TA1、TA2、TA3 依此順序類推；6 月 18 日 1200 UTC：(d)(e)(f)；6 月 19 日 1200 UTC：(g)(h)(i)；6 月 20 日 1200 UTC：(j)(k)(l)的 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和比於垂直方向加總。單位為(g/kg)

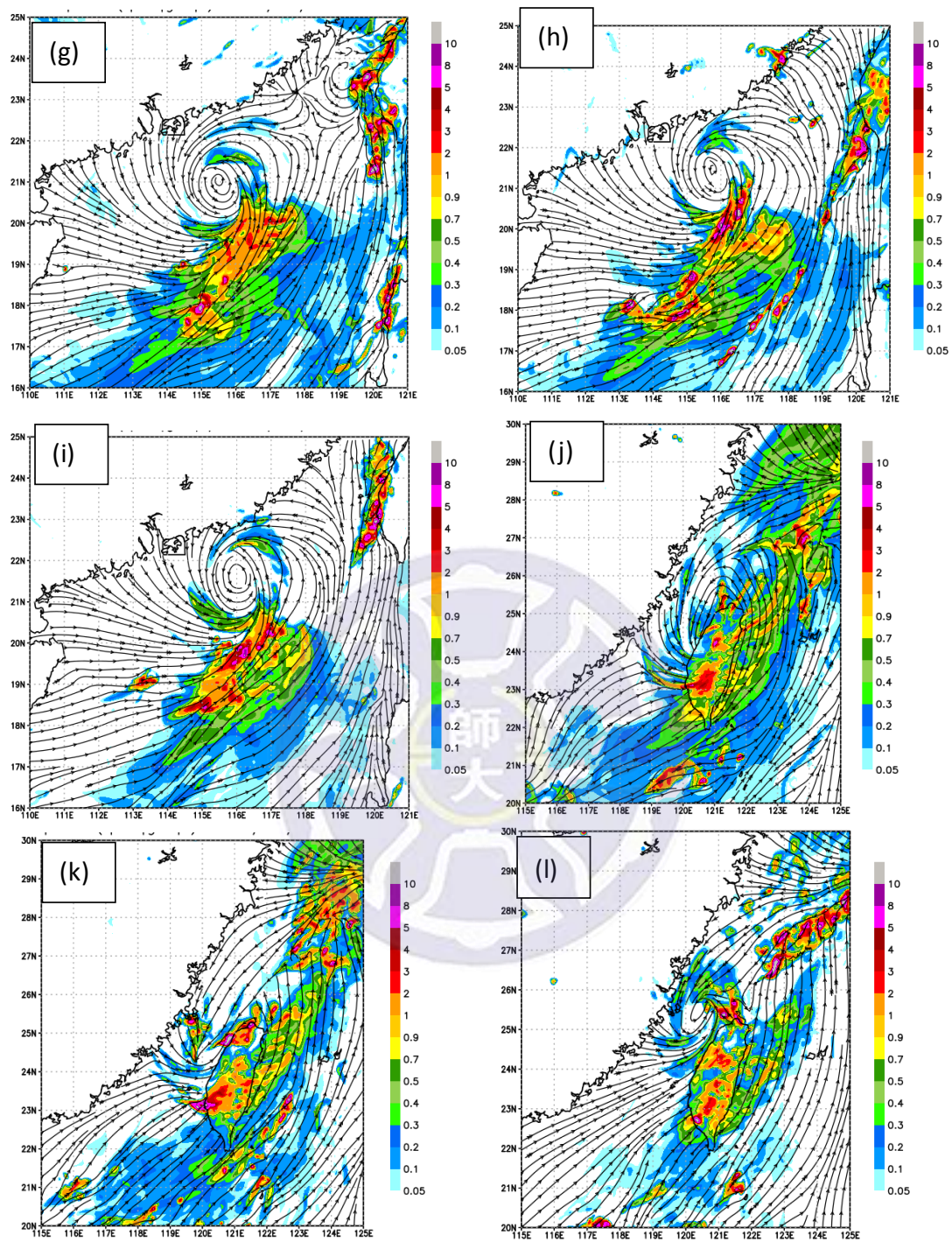


圖 5.8。

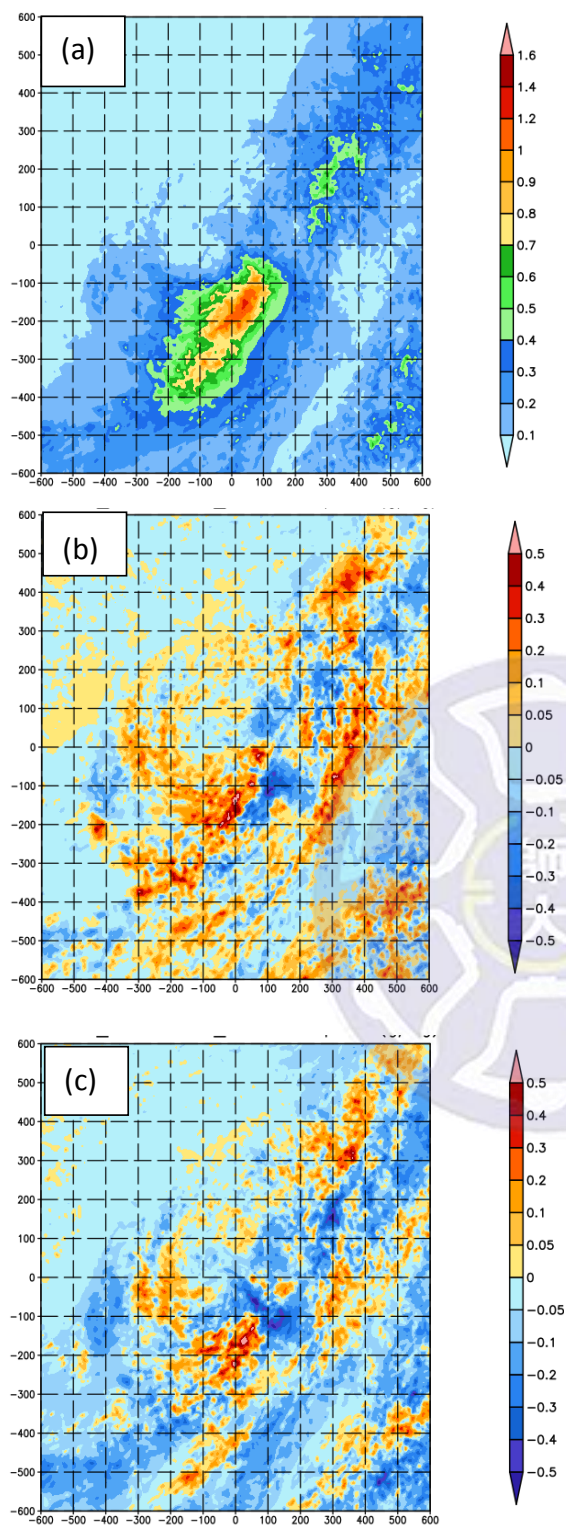


圖 5.9。為泰利颱風生命週期(6 月 17 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC，共 96 小時)之降水粒子(雨、雪、雹)之(a)TA1 混合比(b)TA2-TA1 之混合差異比(c)TA3-TA1 之混合差異比。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)

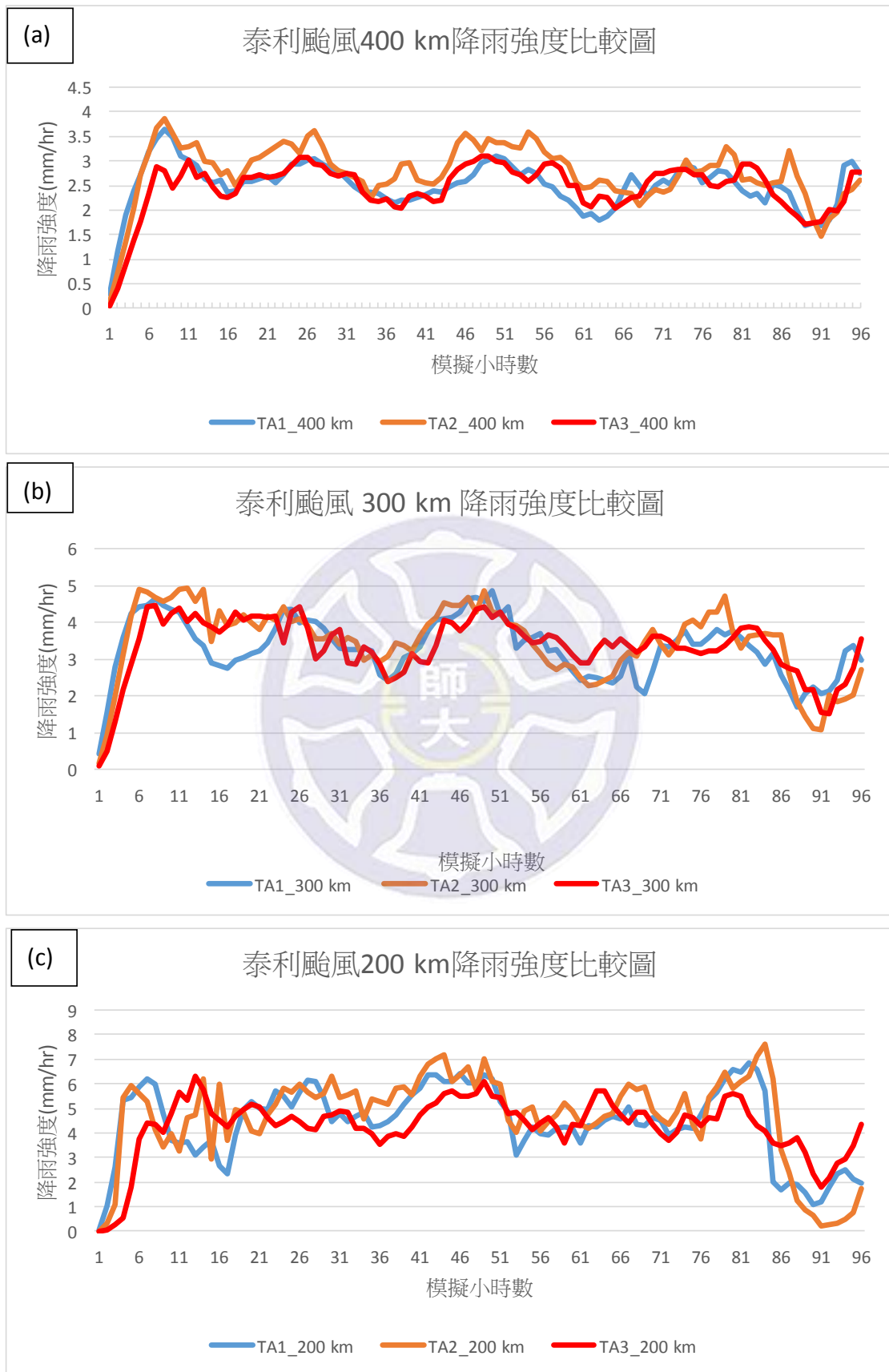


圖 5.10 為泰利颱風在 400、300、200 半徑內取格點平均的逐時降雨強度比較圖。藍色為 TA1、

橘色為 TA2、紅色為 TA3。

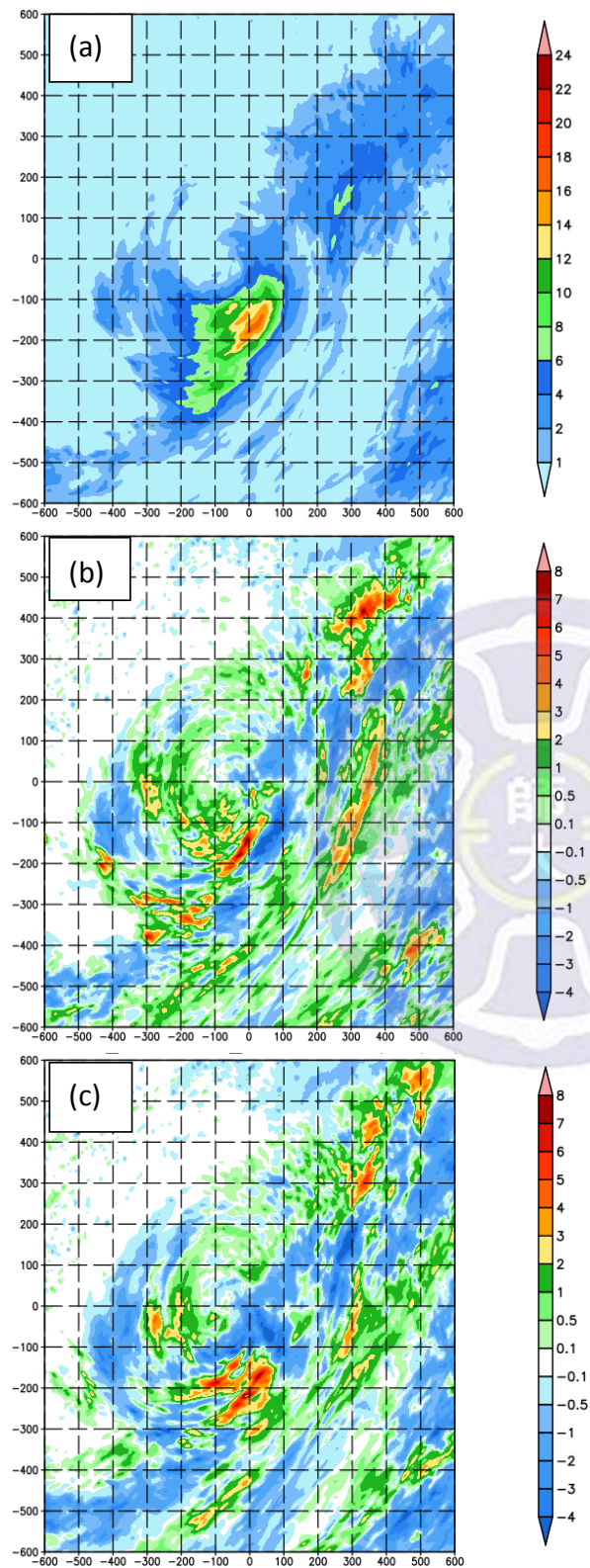


圖 5.11。為泰利颱風生命週期(6 月 17 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC，共 96 小時)之降雨強度，單位(mmhr^{-1})(a)TA1(b)TA2-TA1 之降雨強度差異(c)TA3-TA1 之降雨強度差異。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)

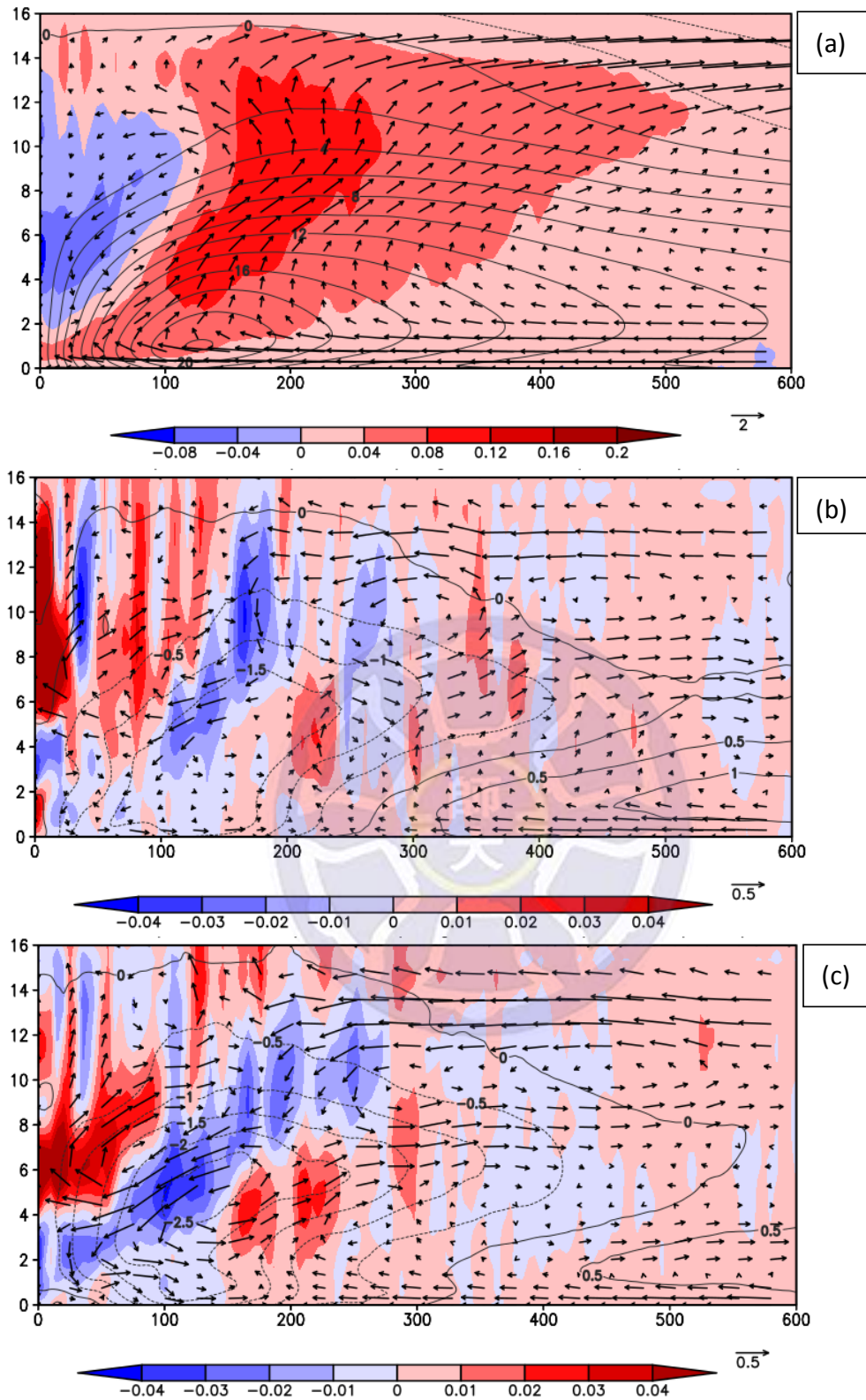


圖 5.12。泰利颱風 6 月 17 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC 之軸對稱圖。X 軸為到颱風中心點的距離，Y 軸為到地表的距離，單位為公里。參數為：平均切向風(ms^{-1} ，等值線標示，(a)間距為 2；(b)(c)間距為 0.5)、垂直分量(色階，單位為 10 ms^{-1})、環流(徑向風和垂直速度，為箭頭標示)。(a)為 TA1(b)TA2-TA1(c)TA3-TA1。

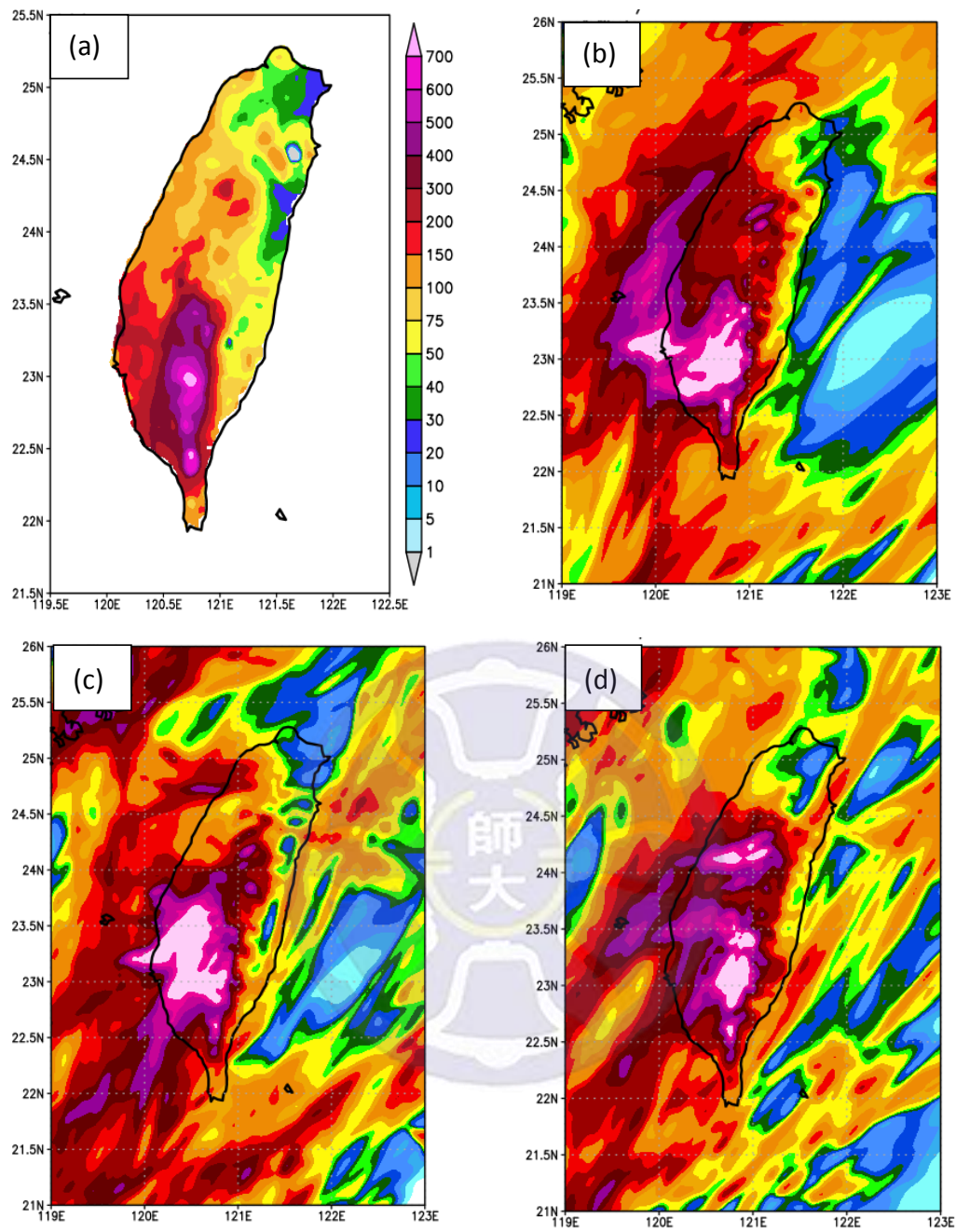


圖 5.13。為 6 月 18 日 0000 UTC 到 6 月 21 日 0000 UTC 之 72 小時累積雨量圖。單位為 mm，4 張圖色階都相同。(a)CWB(b)TA1(c)TA2(d)TA3。

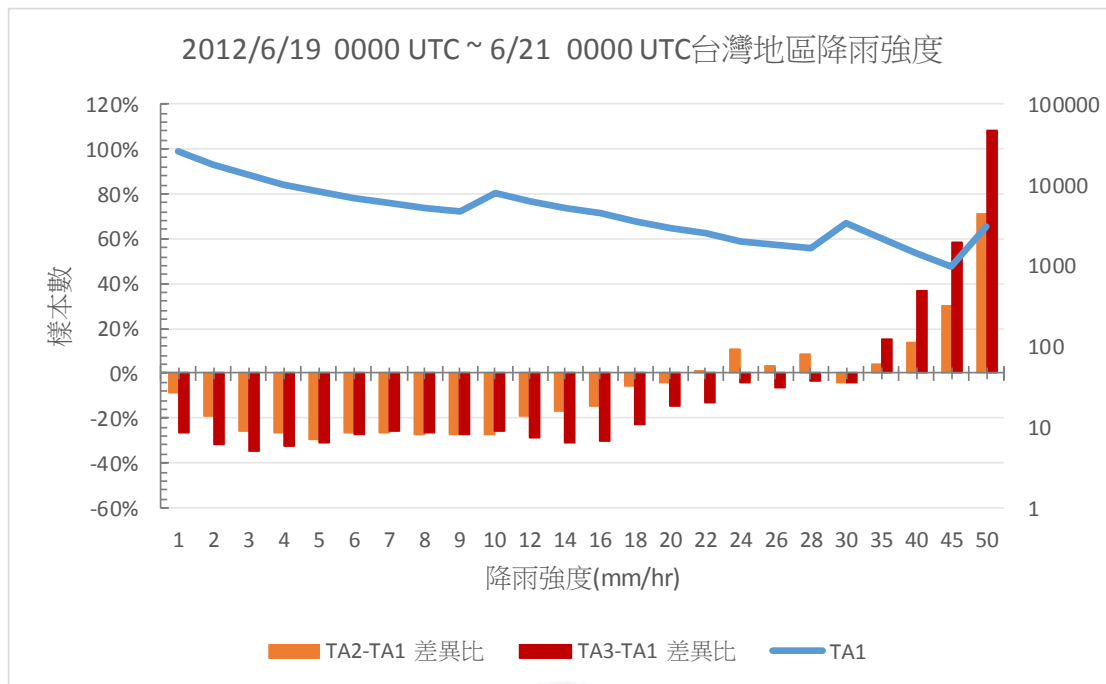


圖 5.14。2012 年 6 月 19 日 0000 UTC 到 21 日 0000 UTC 台灣地區降雨強度樣本數和差異比。





圖 5.15。為取 400 公里內的降水格點的比較圖。每一個格點就是一個樣本。藍色線為 TA1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 TA2-TA1 的差異比，紅色為 TA3-TA1 的差異比，坐標軸為左方。

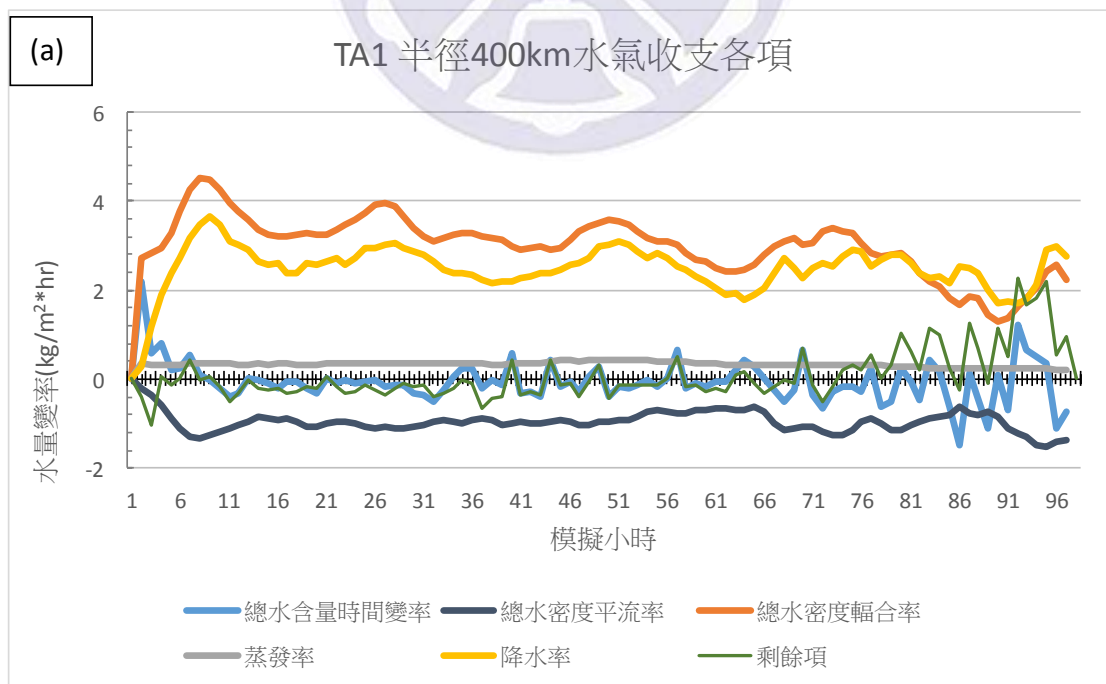


圖 5.16 待續。半徑 400 公里內水氣收支各項逐時變化圖。(a)TA1(b)TA2(c)TA3。

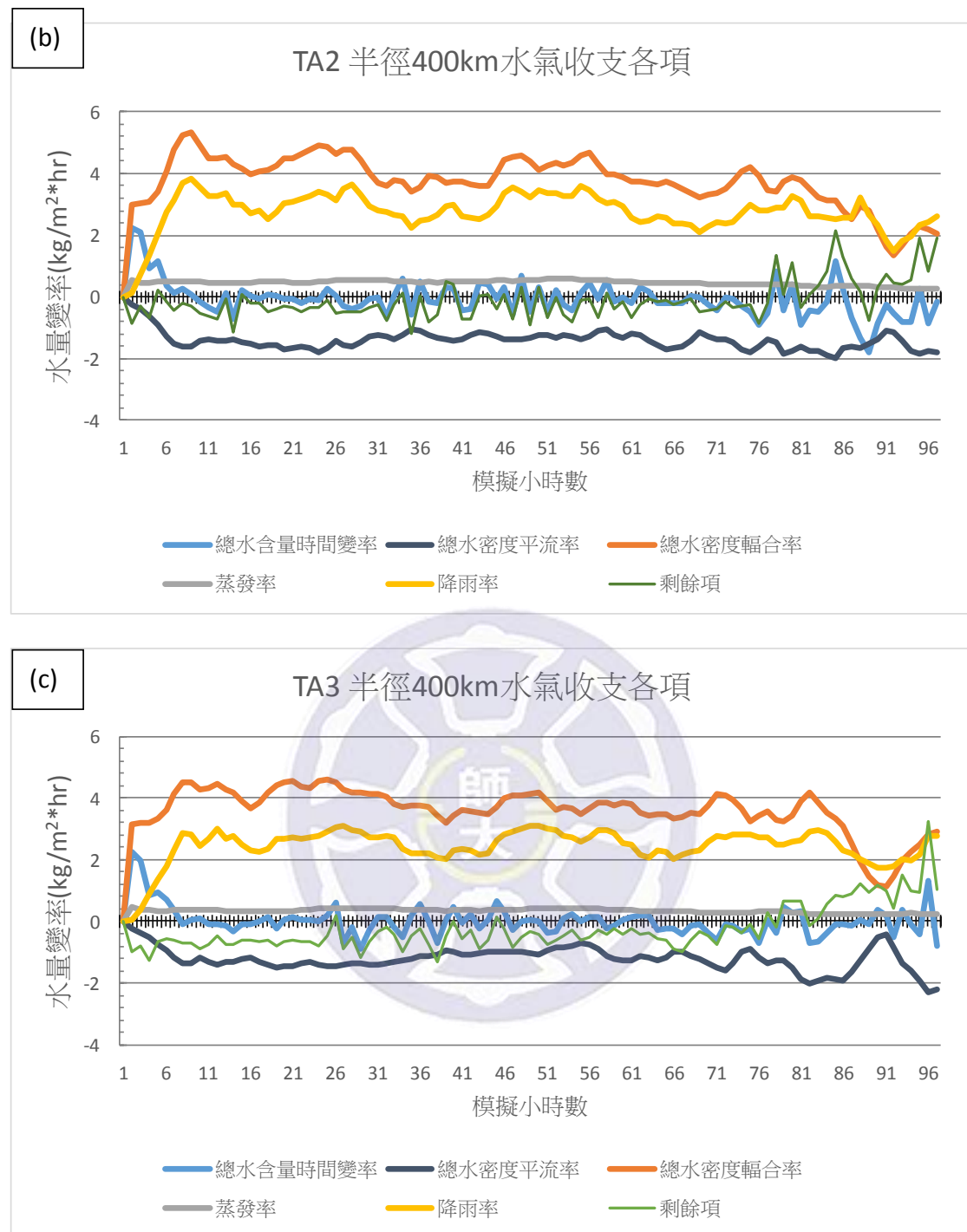


圖 5.16。

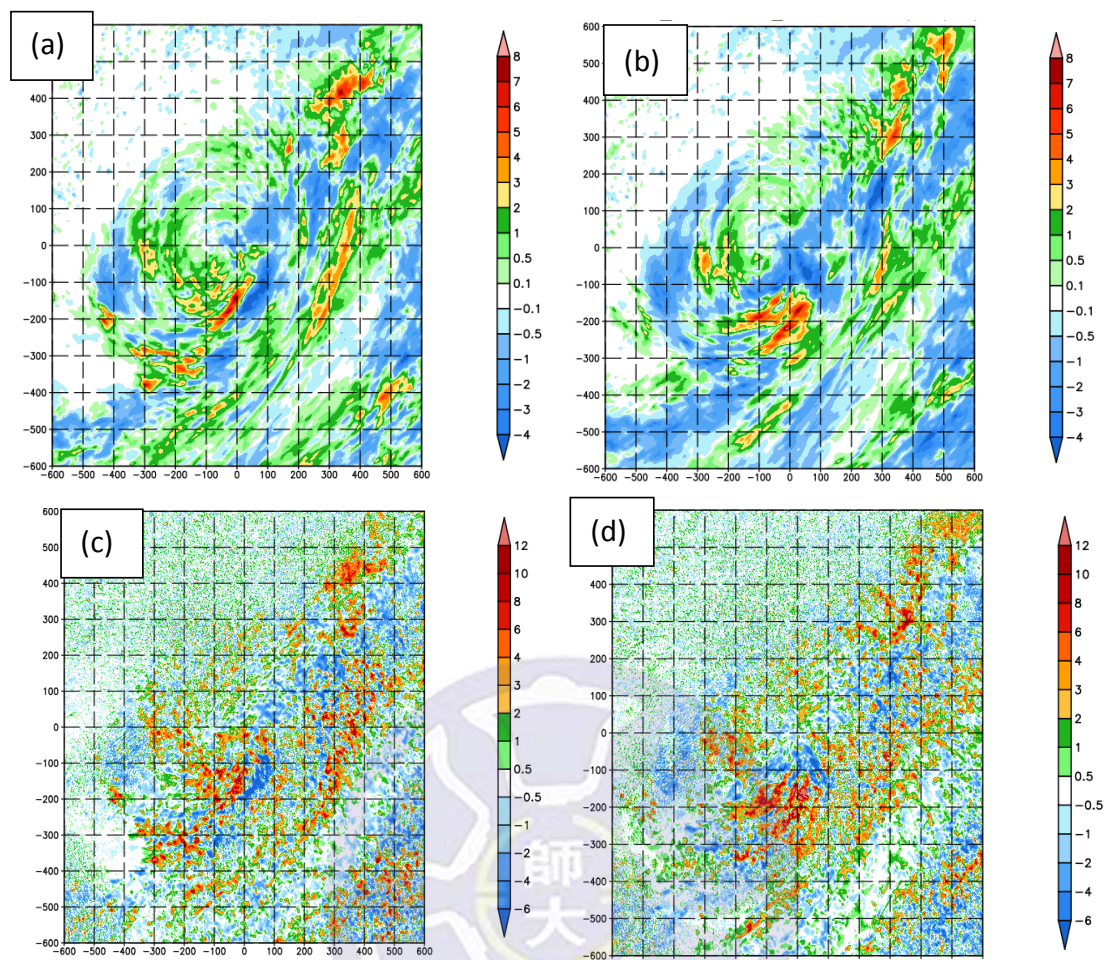


圖 5.17。(a)(b)分別為 TA2-TA1 和 TA3-TA1 的降雨強度差異(單位 mmhr^{-1})，(c)(d)分別為 TA2-TA1 和 TA3-TA1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 $\text{kg/m}^2\text{hr}$)。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)。

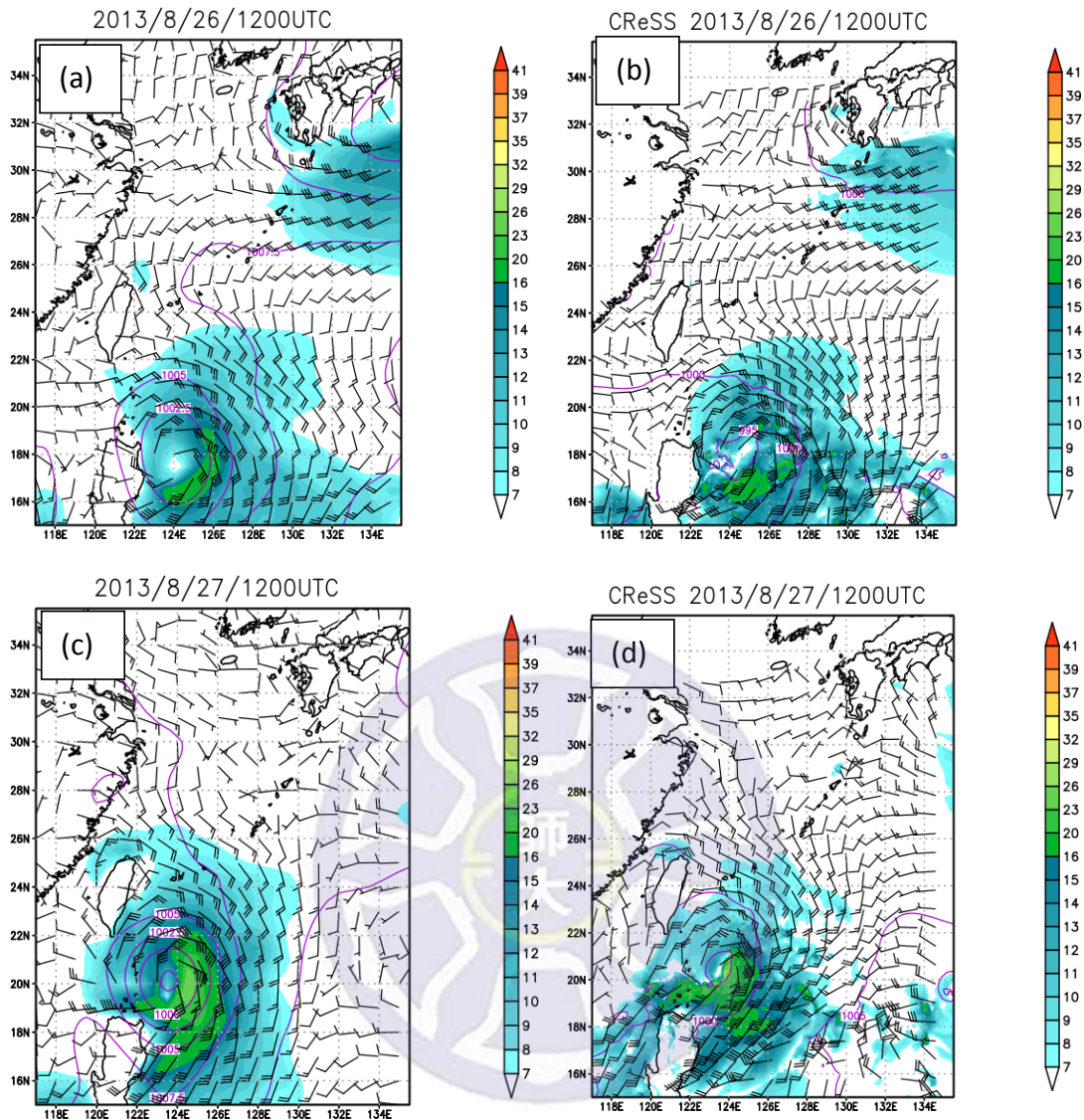


圖 6.1 待續。2013 年 8 月 26 日到 29 日之 1200 UTC，(a)(c)(e)(g)為 NCEP GFS 的 1000hPa 的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、風速(色階：單位 ms^{-1})、海平面氣壓(曲線：單位為 hPa，每條間隔 2.5 hPa)以及對應到的(b)(d)(f)(h)(i)(l)為同一個時間的 CReSS，離地表 50m 高的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、10 公尺高的風速(色階：單位 ms^{-1})，和氣壓場(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)

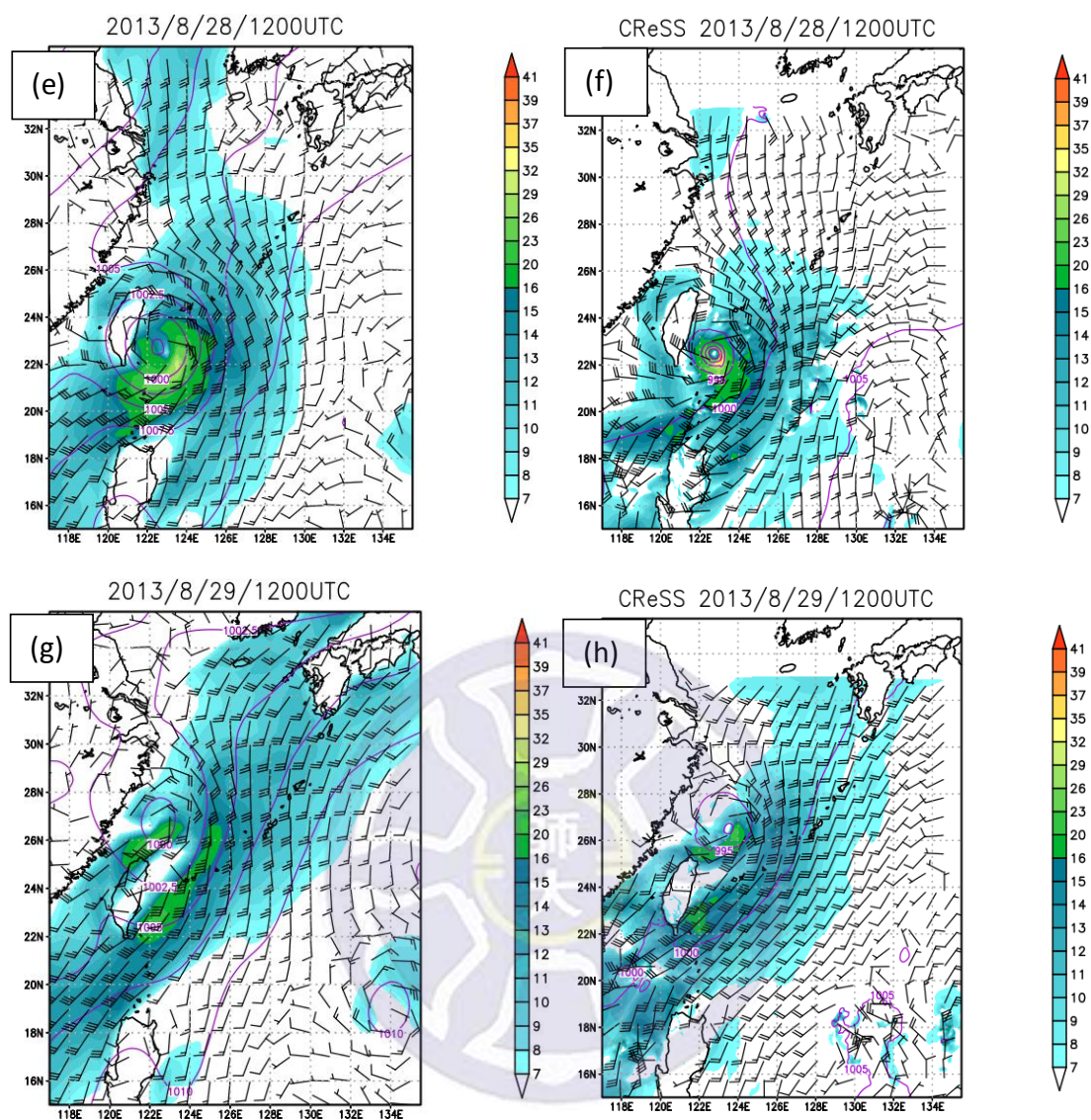


圖 6.1，完。

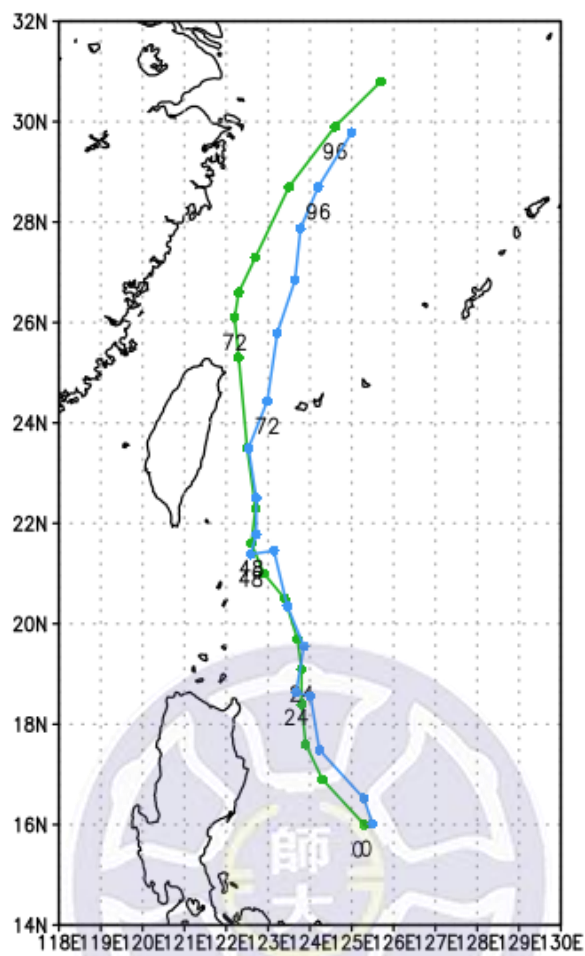


圖 6.2。康芮颱風之中央氣象局最佳路徑路徑和 CReSS 路徑圖，每六小時打一點，每 24 小時標記一次。時間為 2013 年 8 月 26 日 0000 UTC 到 8 月 30 日 0600 UTC(中央氣象局路徑僅到 20 日 1800 UTC)。藍色線為 KO1；綠色線為中央氣象局最佳路徑。

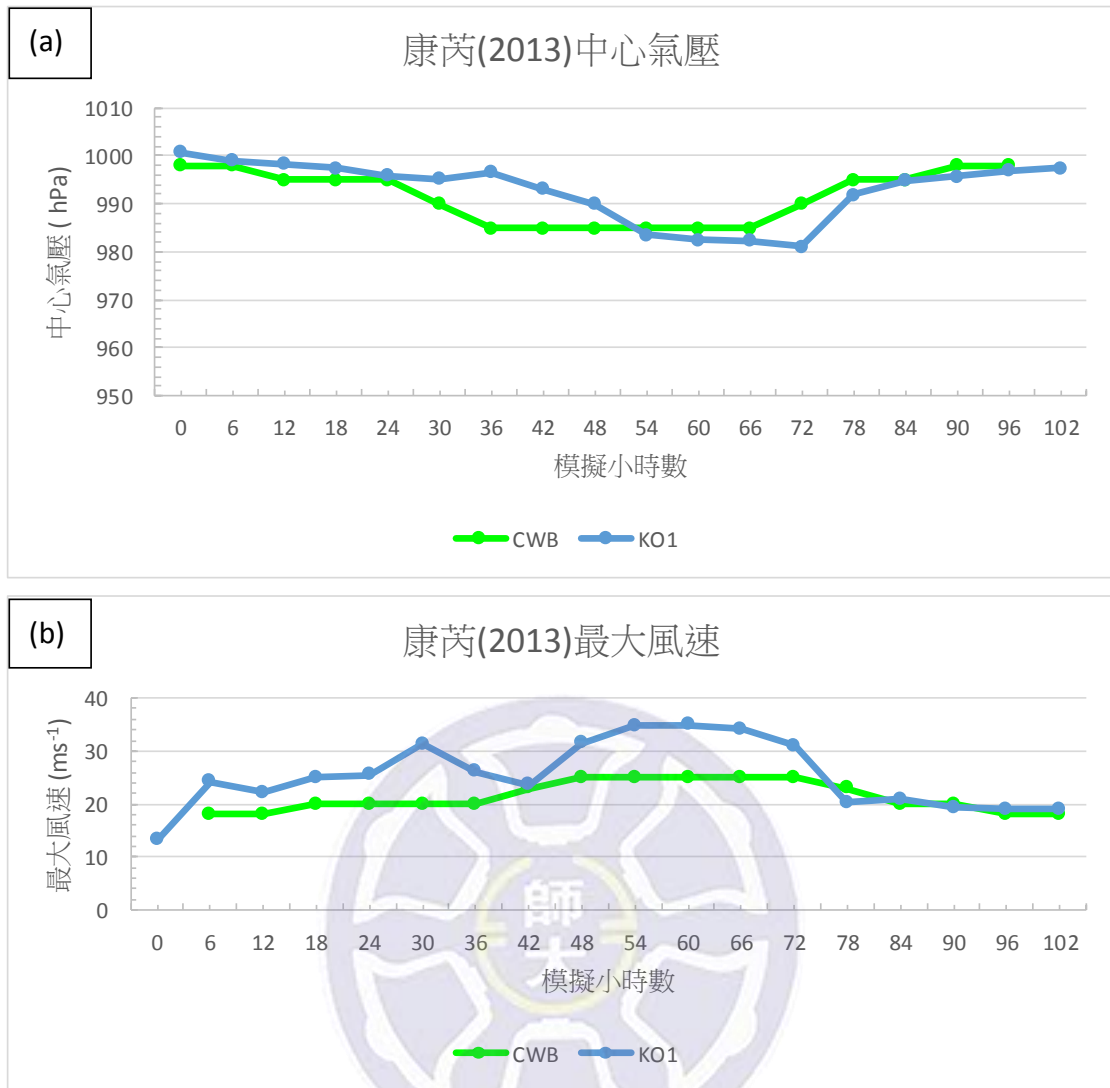


圖 6.3。為模擬 KO1 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速(ms^{-1})比較圖

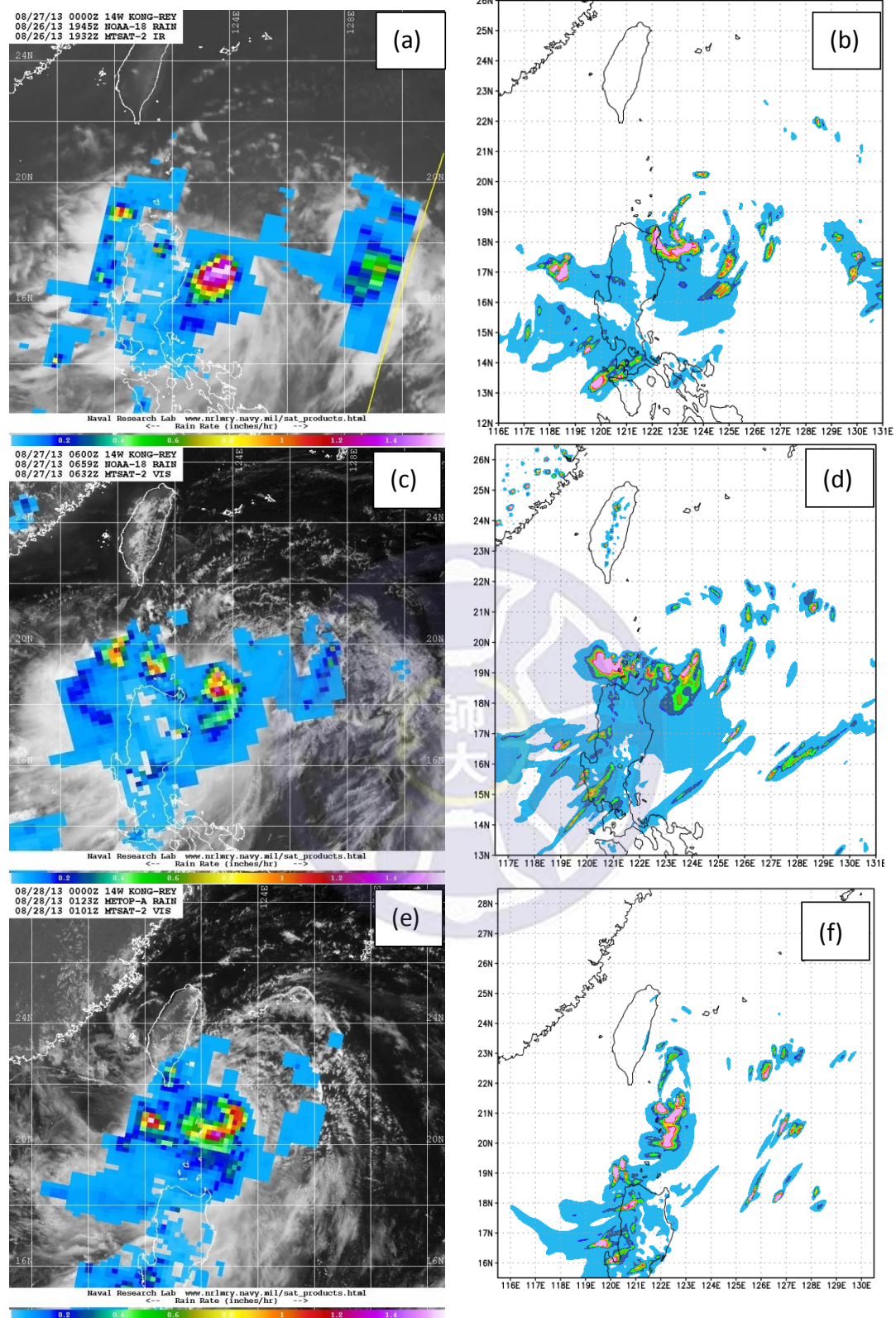
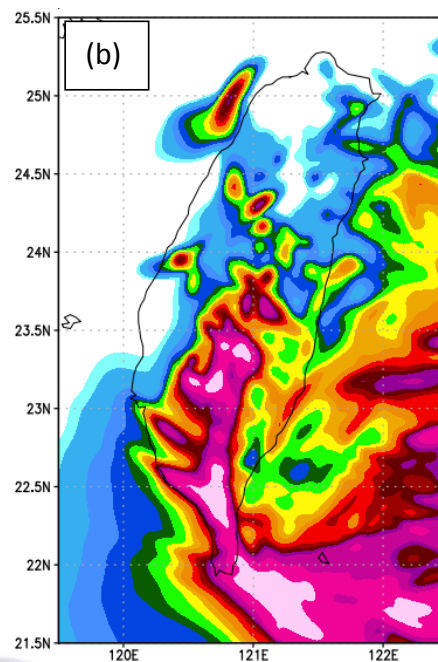
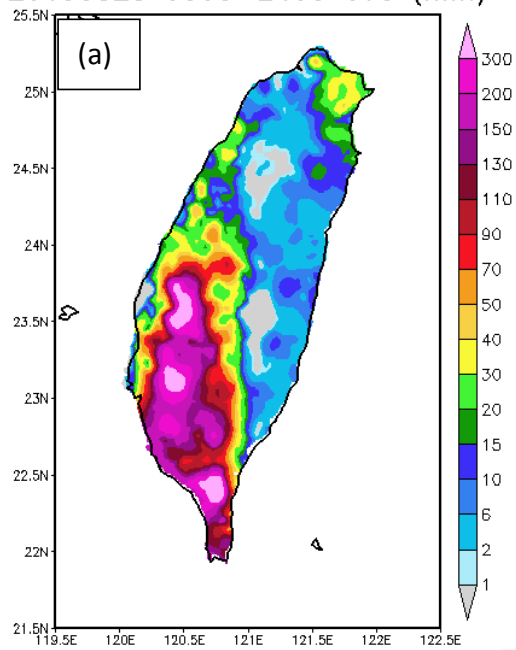


圖 6.4。(a)8/26 1945UTC(c)8/27 0659UTC (e) 8/28 0123UTC 為 NRL 衛星觀測資料，(b)(d)(f)為 KO1 模擬的資料，參數皆為降雨強度，單位為(inches/hr)

20130828 0000-2400 UTC (mm)



20130829 0000-2400 UTC (mm)

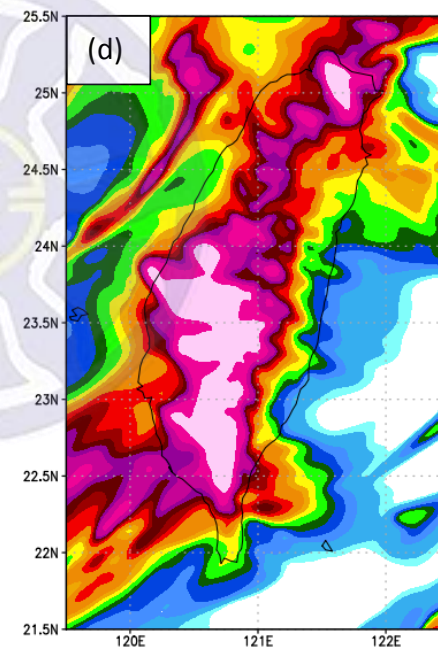
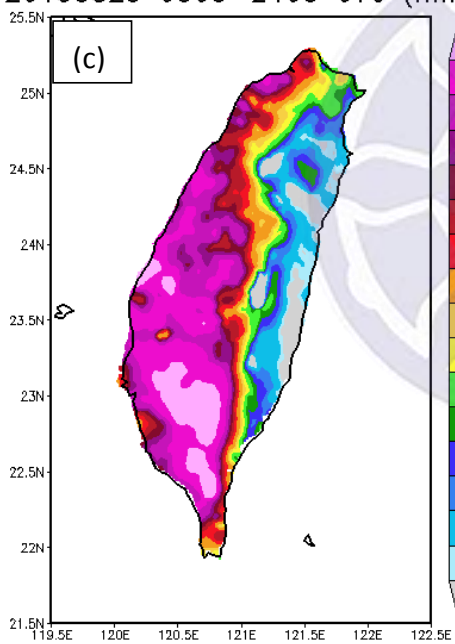


圖 6.5。(a)(c)為觀測資料的 2013 年 8 月 28 日和 29 日 24 小時累積降雨圖。(b)(d)為 KO1 模擬結果的 24 小時累積降雨圖。左右色階相同，單位皆為 mm。

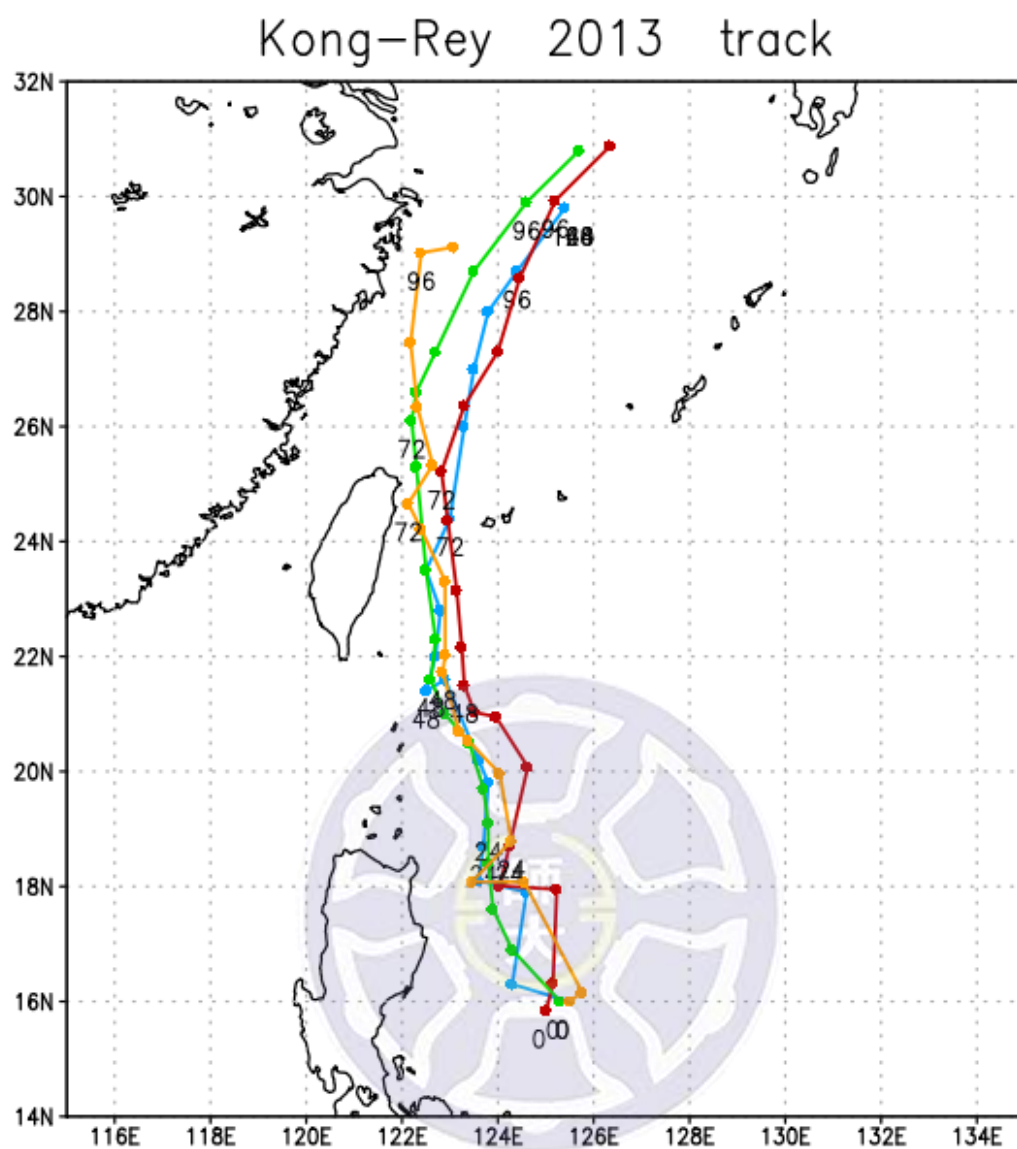


圖 6.6。為康芮颱風之觀測和模擬路徑圖。綠色為 CWB 路徑，藍色為 KO1 路徑，橘色為 KO2 路徑，紅色為 KO3 路徑。每 6 小時一筆，每 24 小時標記數字。

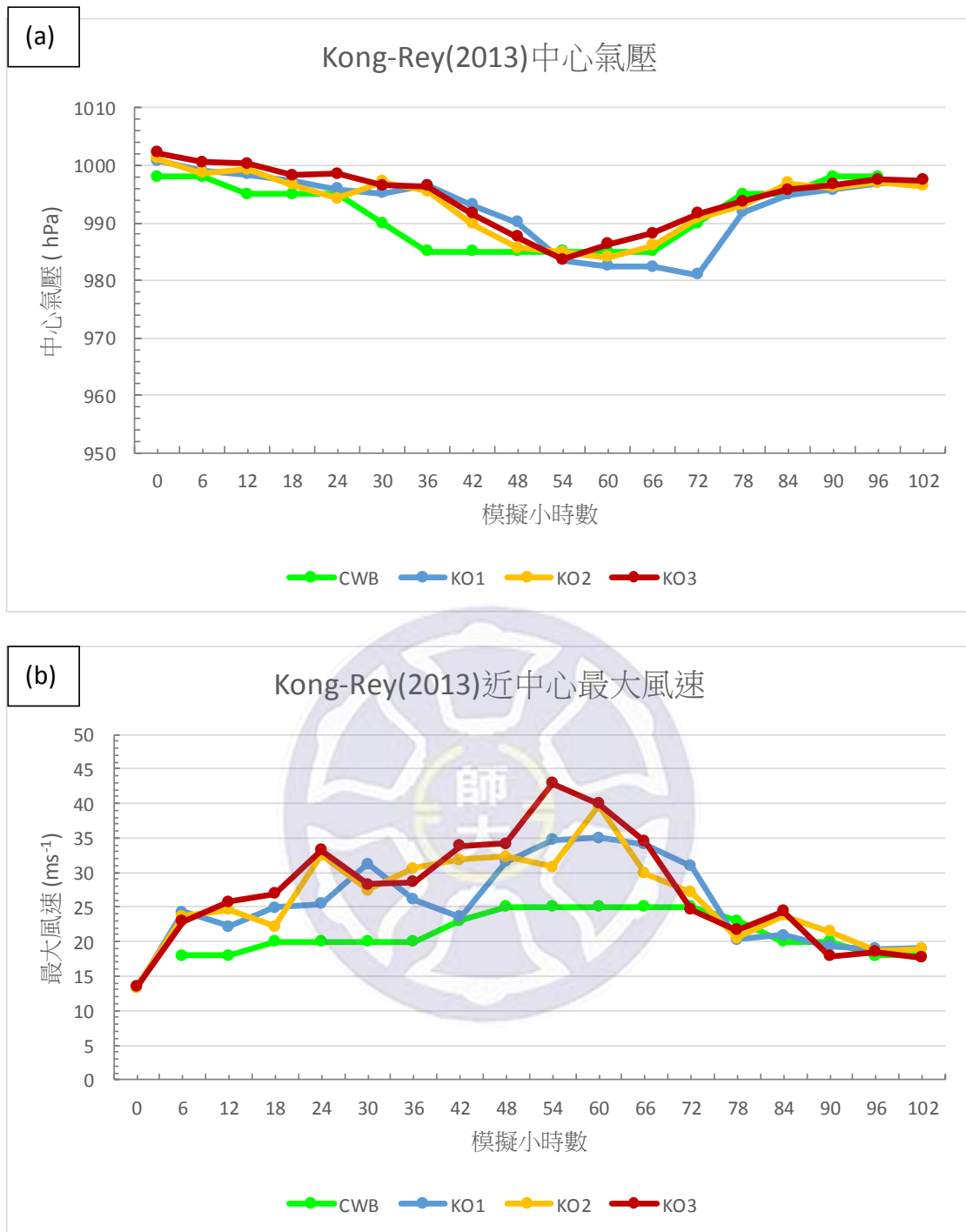


圖 6.7。為模擬 KO1、KO2、KO3 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速(ms⁻¹)比較圖。

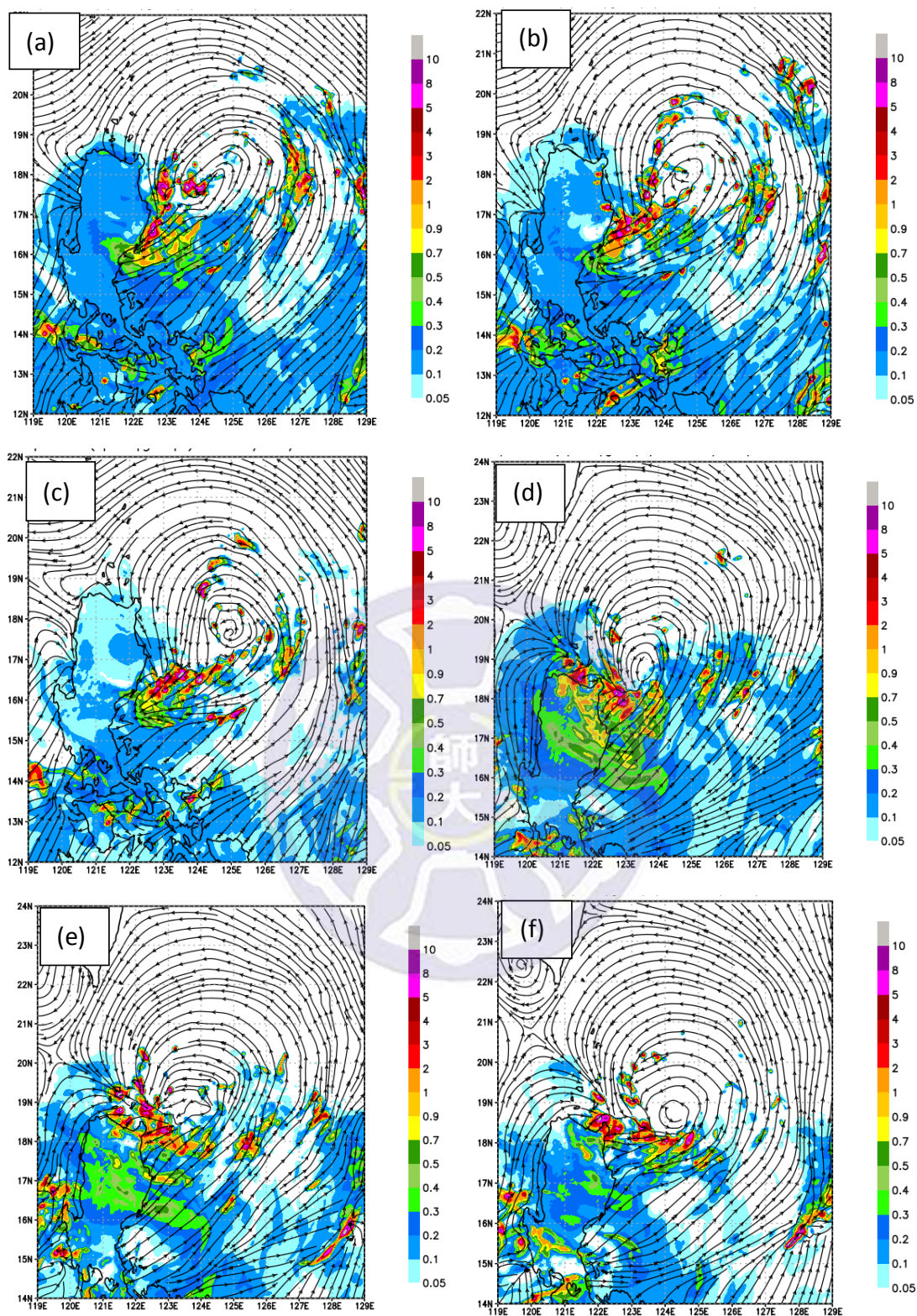


圖 6.8 待續。為康芮颱風之 8 月 26 日 1200 UTC：(a)(b)(c)，分別為 KO1、KO2、KO3 依此順序類推；8 月 27 日 0000 UTC：(d)(e)(f)；8 月 28 日 0000 UTC：(g)(h)(i)；8 月 29 日 0000 UTC：(j)(k)(l)的 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和比於垂直方向加總。單位為(g/kg)

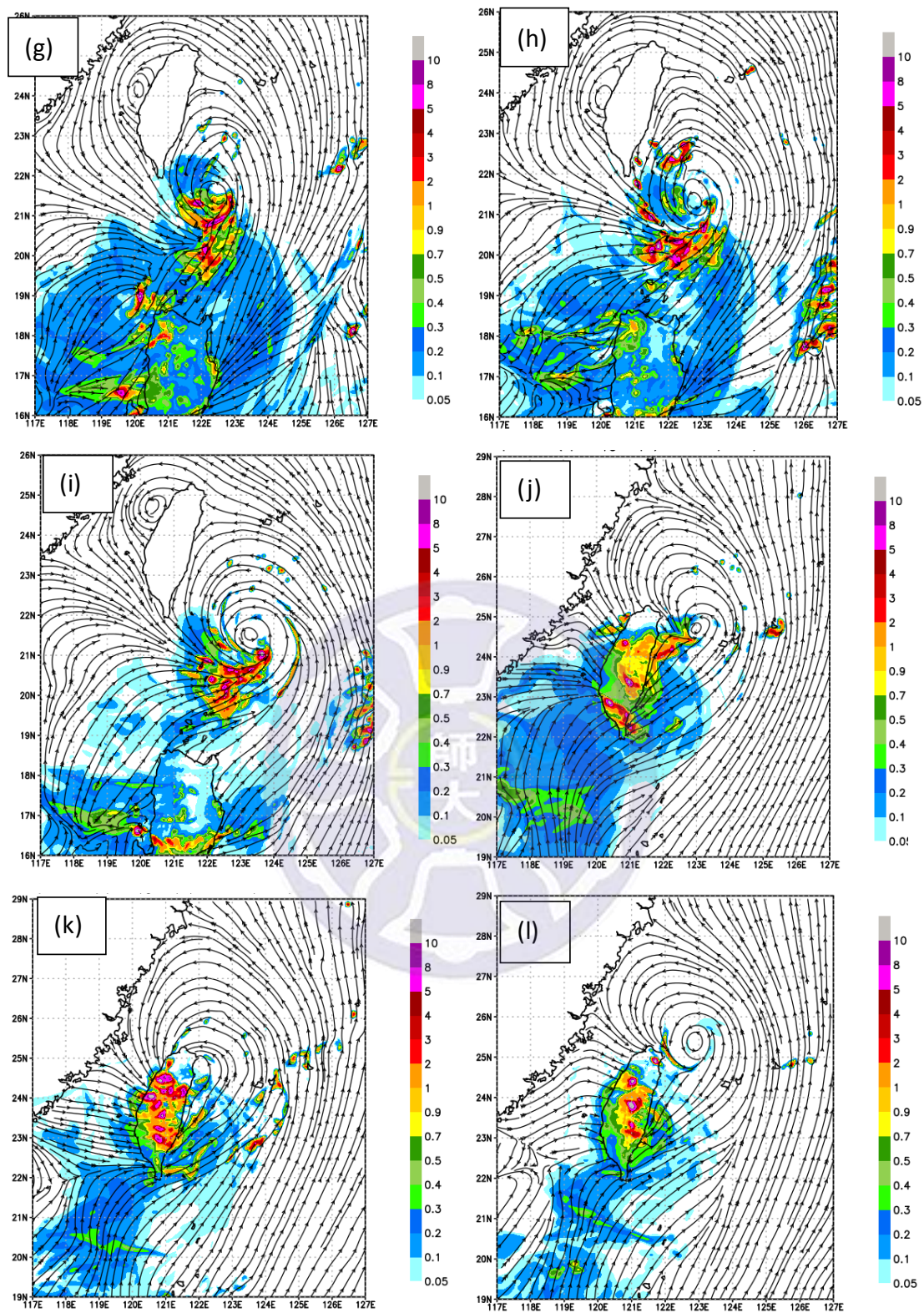


圖 6.8 完。

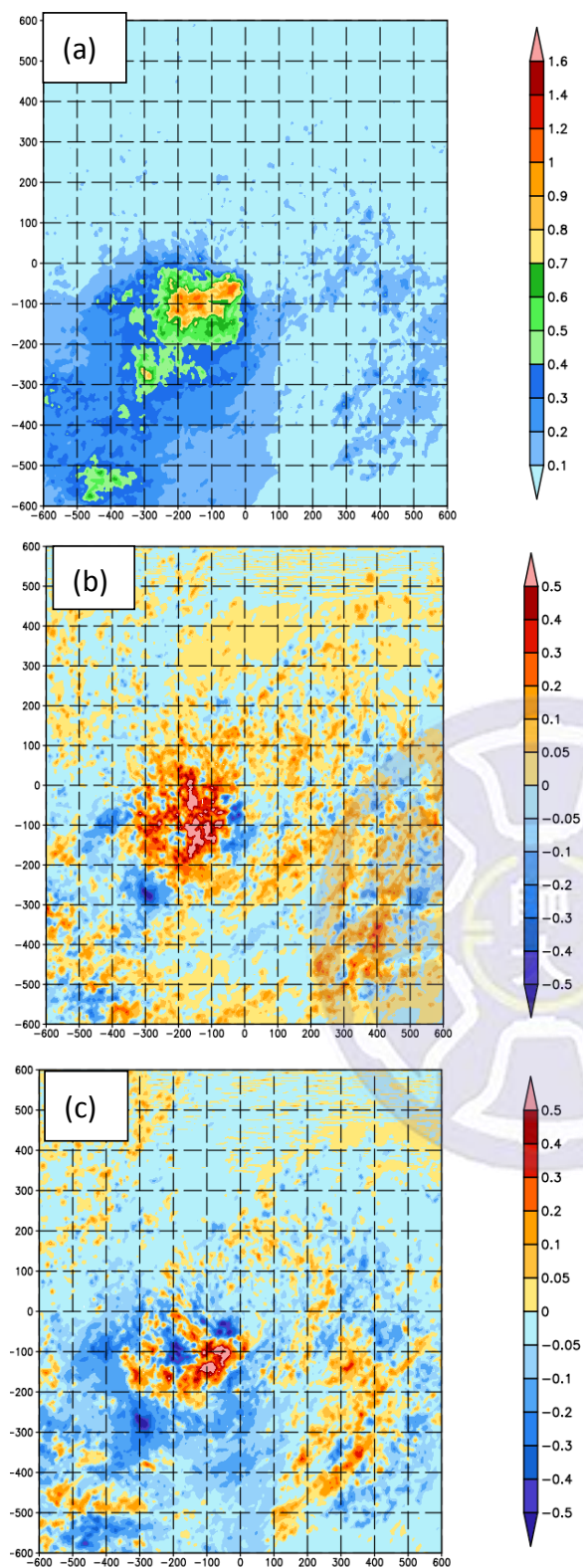


圖 6.9。為康芮颱風生命週期(8 月 26 日 0000 UTC 到 30 日 0600 UTC，共 102 小時)之降水粒子(雨、雪、雹)之(a)TA1 混合比(b)TA2-TA1 之混合差異比(c)TA3-TA1 之混合差異比。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)

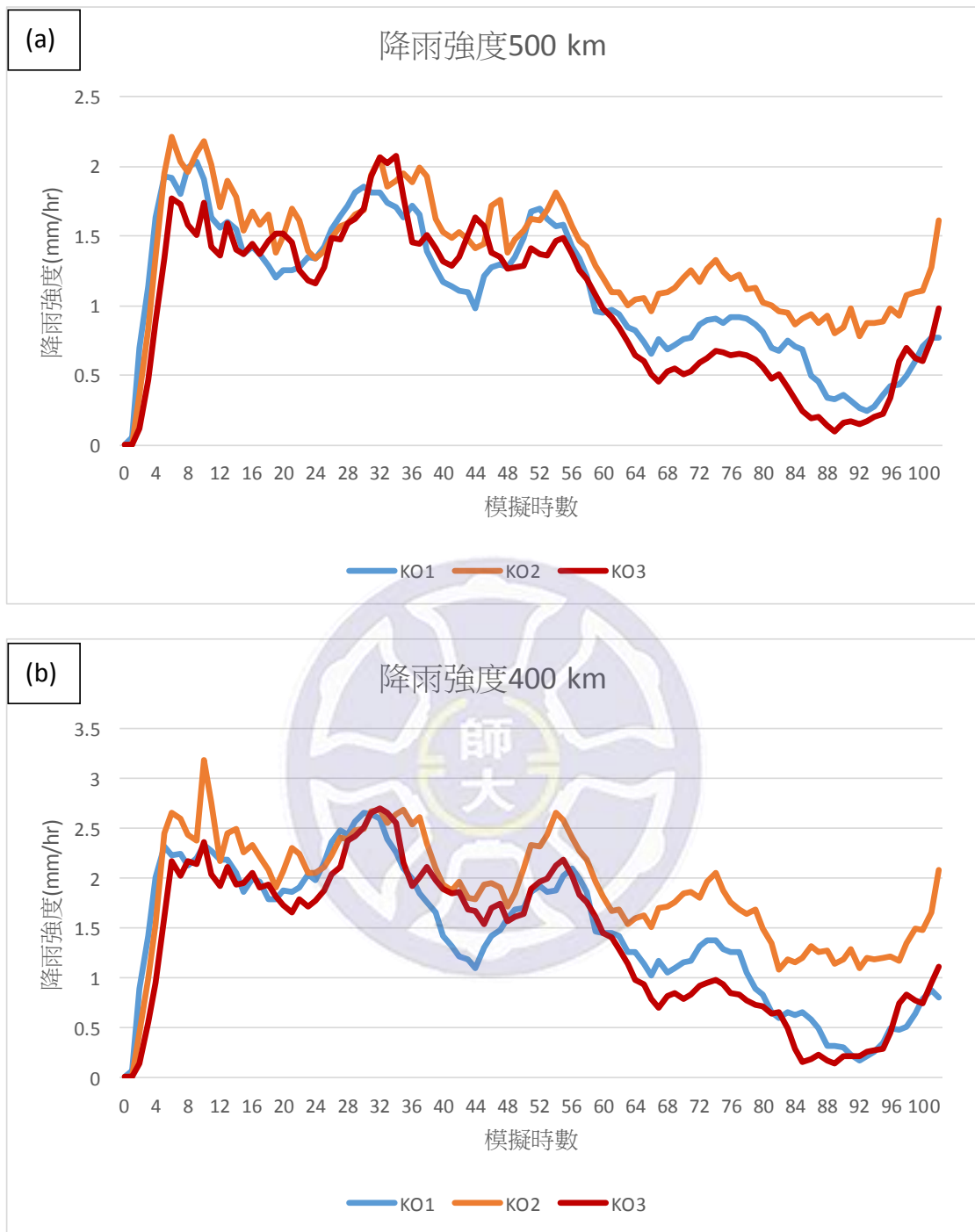


圖 6.10 待續。為康芮颱風在 500、400、300、200 半徑內取格點平均的逐時降雨強度比較圖。藍色為 KO1、橘色為 KO2、紅色為 KO3。

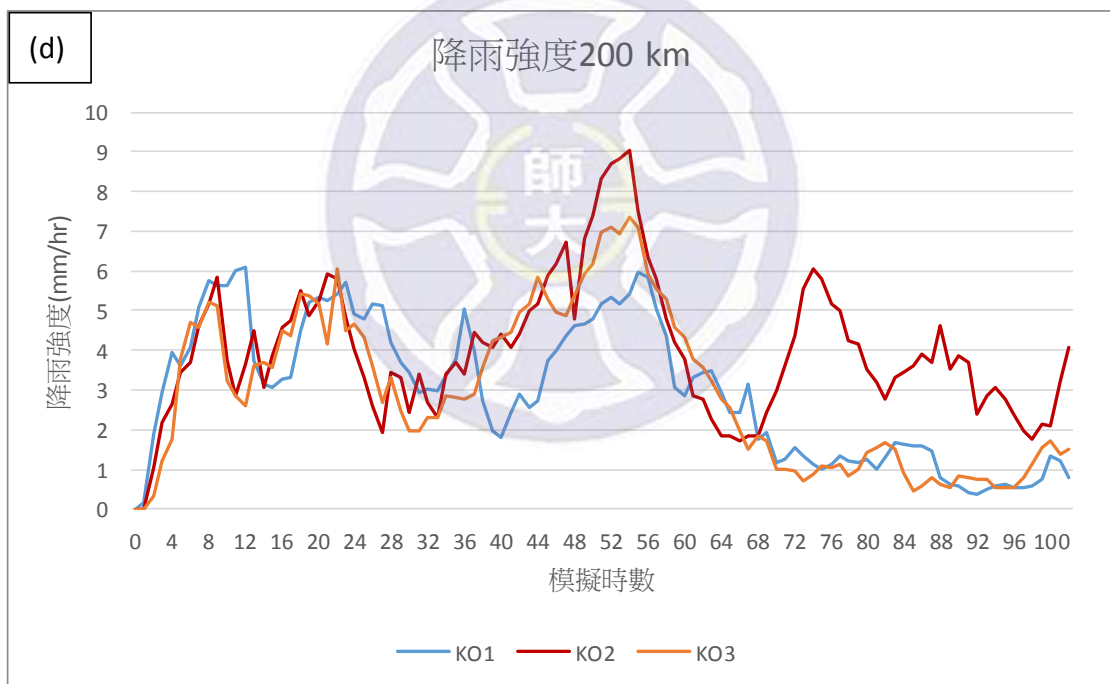
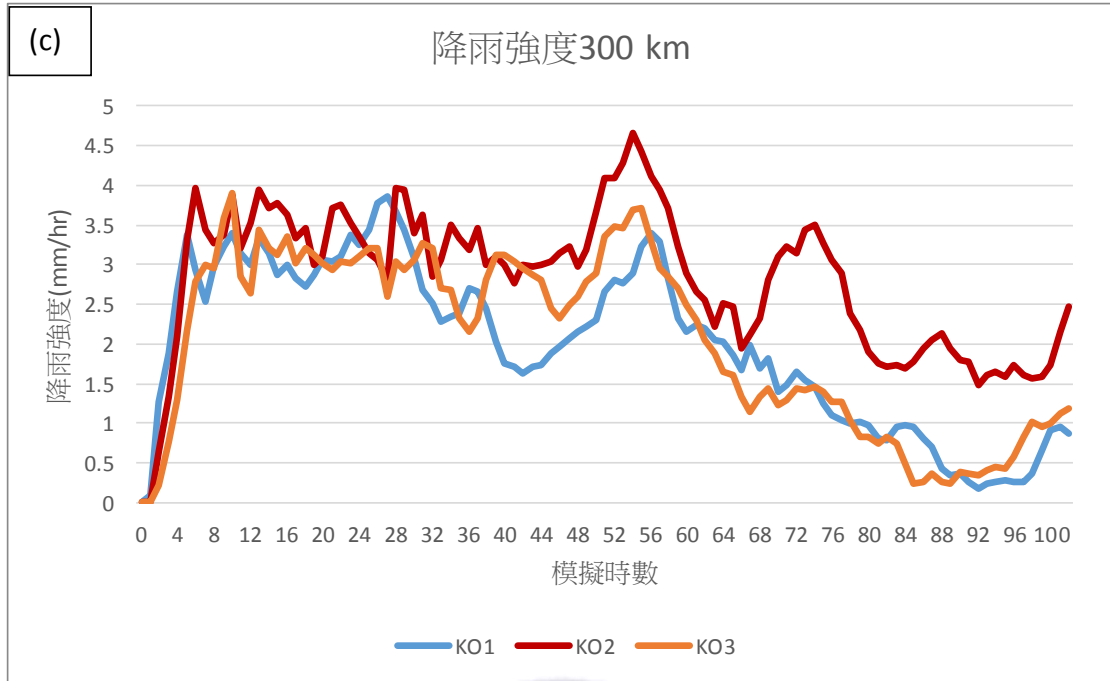


圖 6.10 完。

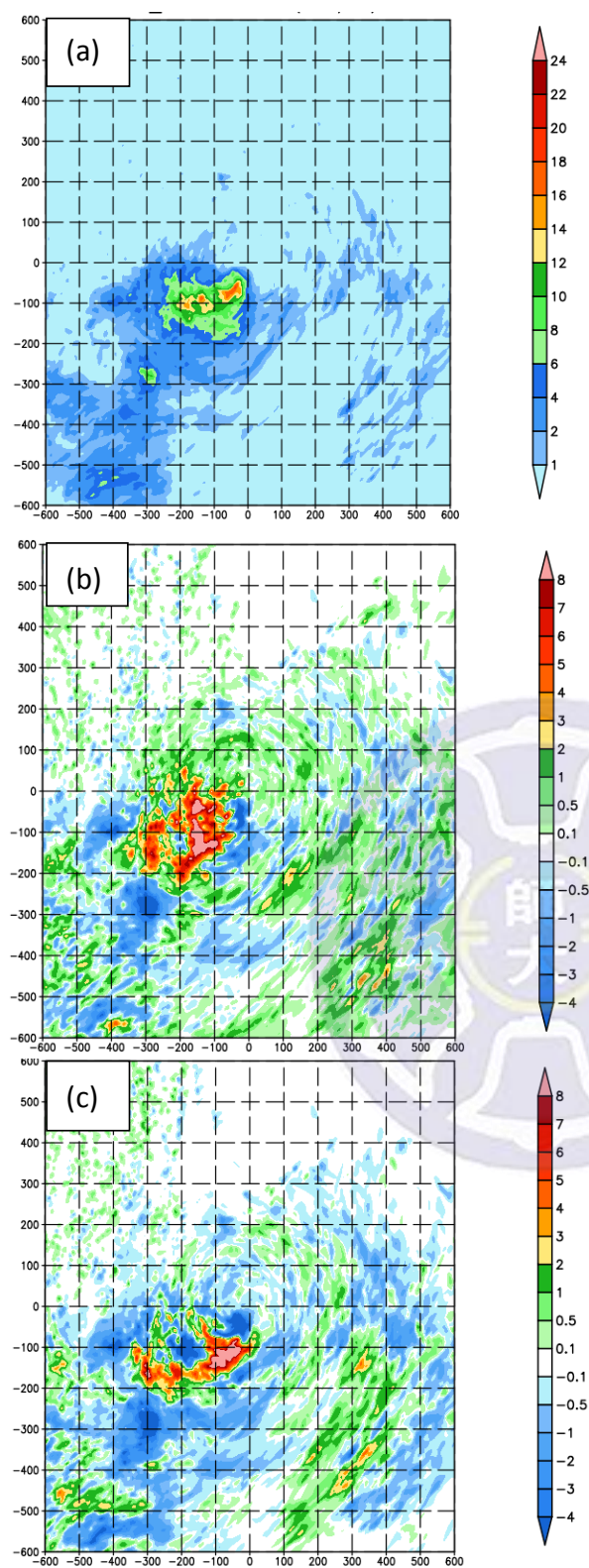


圖 6.11。為康芮颱風生命週期(8 月 26 日 0000 UTC 到 30 日 0600 UTC，共 102 小時)之降雨強度，單位(mmhr^{-1})。 (a)KO(b)KO2-KO1 之降雨強度差異(c)KO3-KO1 之降雨強度差異。X, Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)

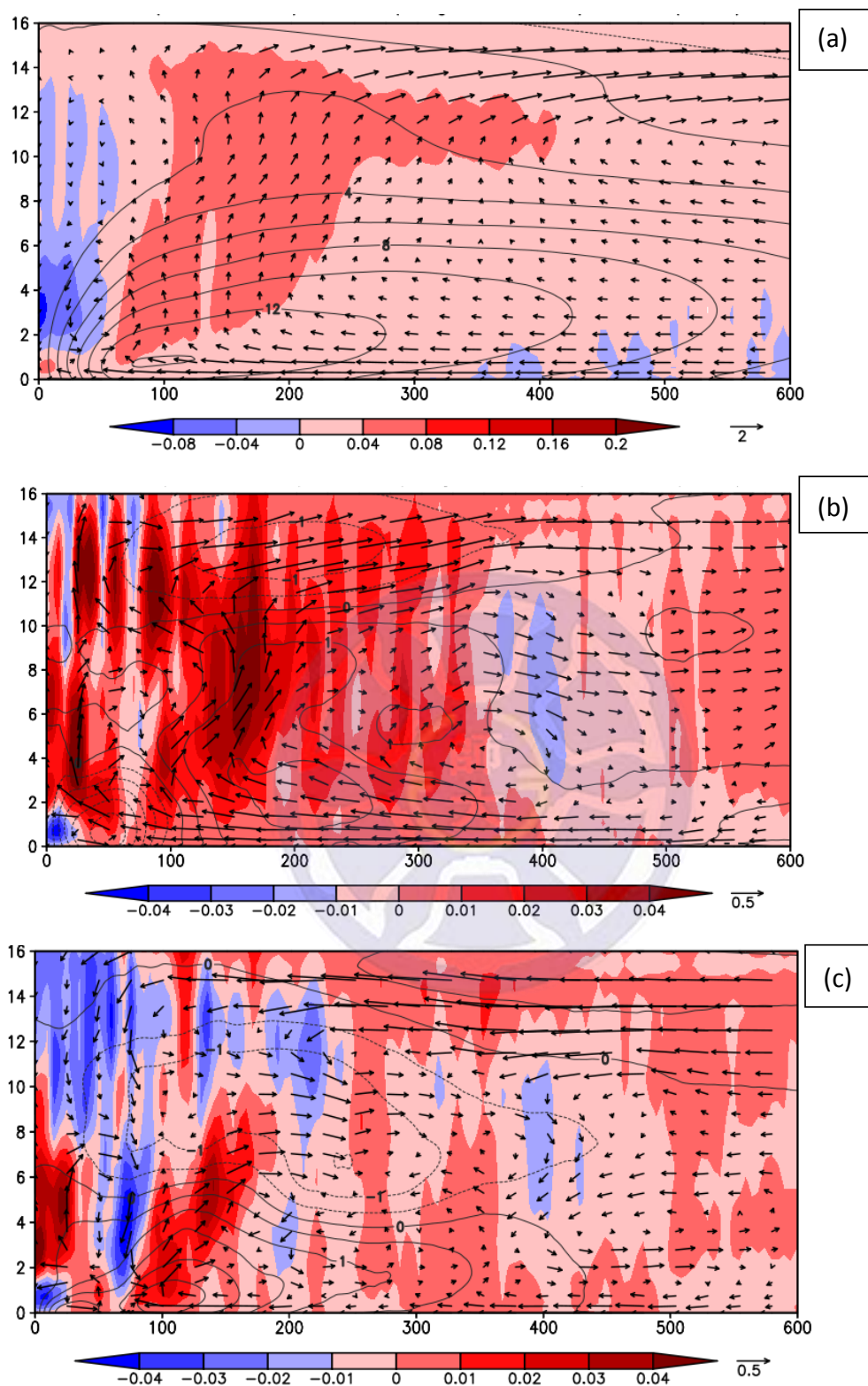


圖 6.12 康芮颱風 8 月 27 日 0000 UTC 到 30 日 0600 UTC 之軸對稱圖。X 軸為到颱風中心點的距離，Y 軸為到地表的距離，單位為公里。參數為：平均切向風(ms^{-1} ，等值線標示，(a)間距為 2；(b)(c)間距為 0.5)、垂直分量(色階，單位為 10 ms^{-1})、環流(徑向風和垂直速度，為箭頭標示)。(a)為 KO1(b)KO2-KO1(c)KO3-KO1。

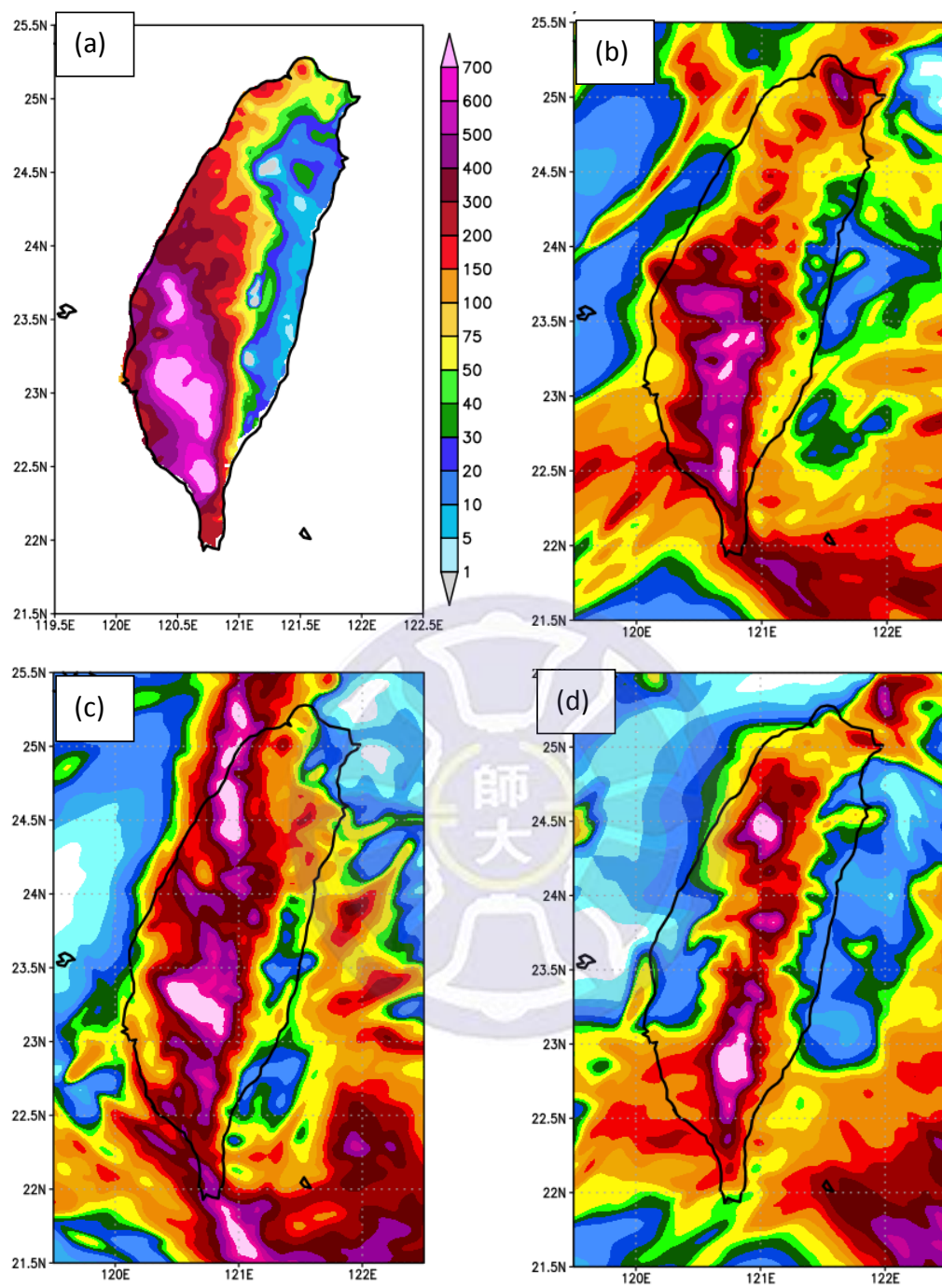


圖 6.13。為 8 月 28 日 0000 UTC 到 8 月 30 日 0000 UTC 之 48 小時累積雨量圖。單位為 mm，4 張圖色階都相同。(a)觀測(b)KO1(c)KO2(d)KO3。

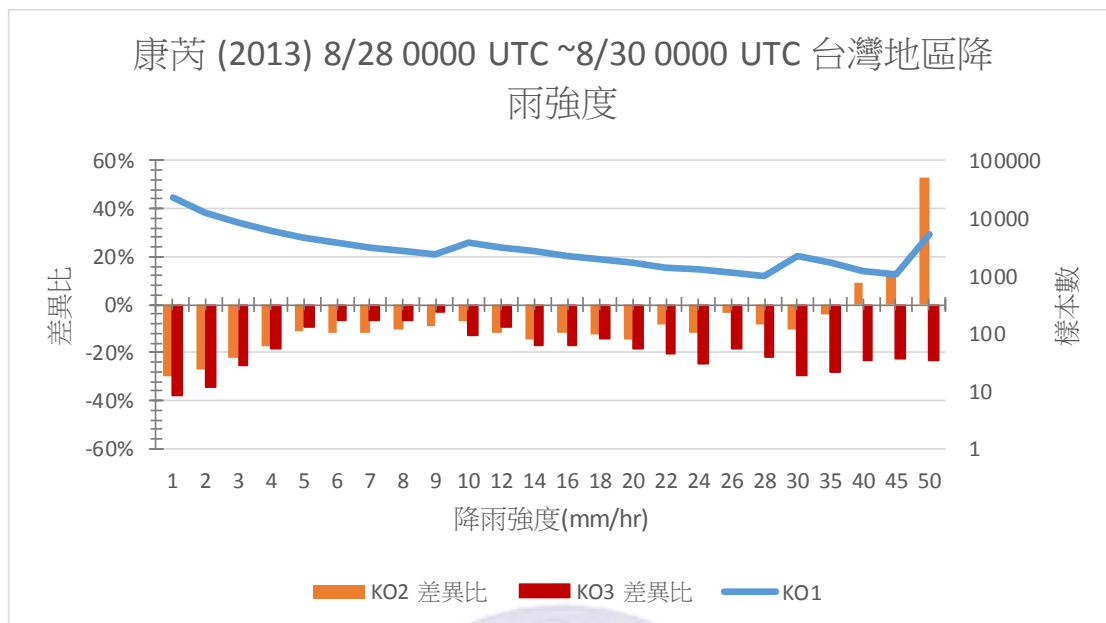


圖 6.14。為台灣地區 28 日 0000 UTC 到 30 日 0000 UTC 之降雨強度樣本數和差異比。



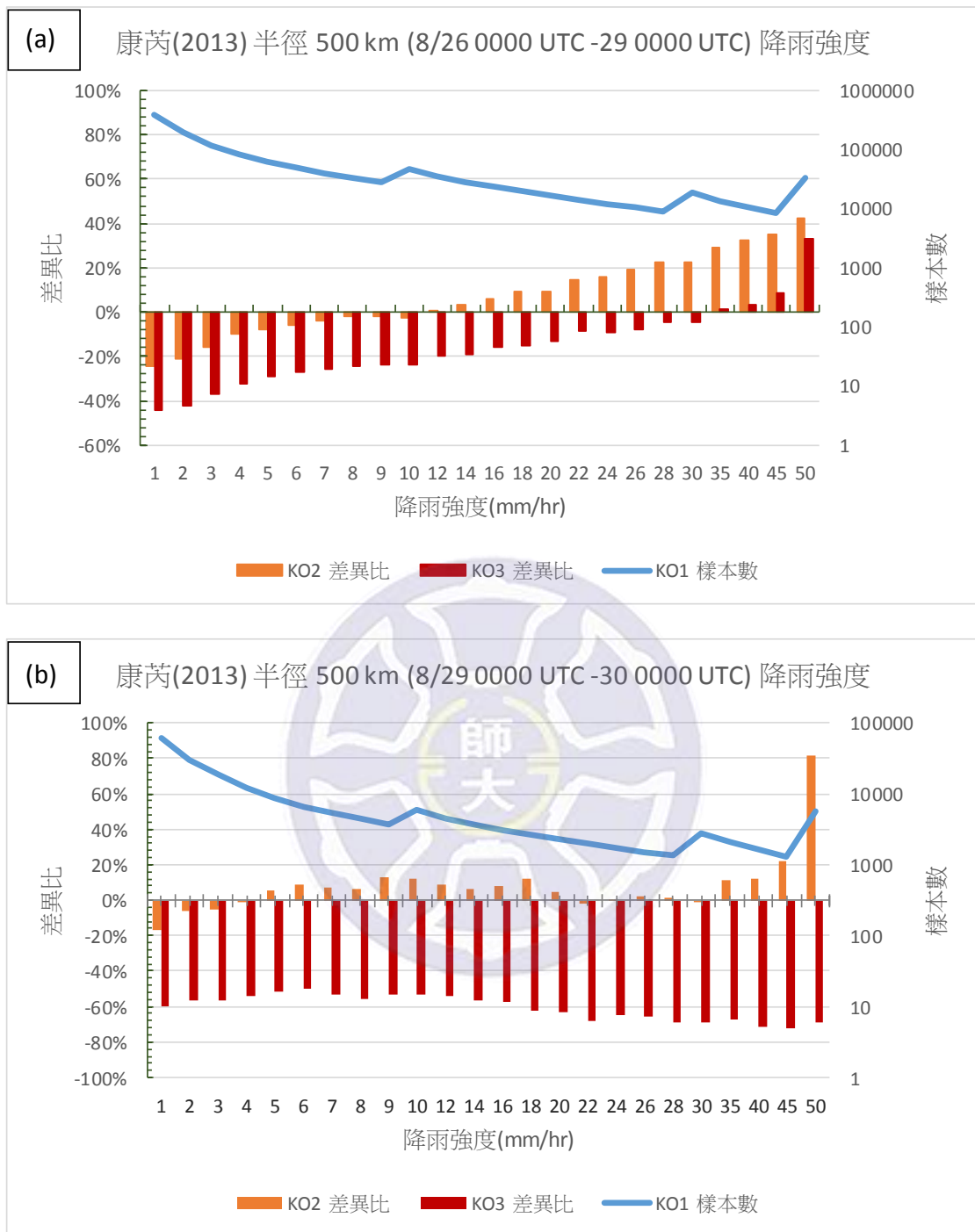


圖 6.15。為康芮颱風降雨強度樣本數和 KO2、KO3 的差異比，(a)模擬第 72 小時前(b)模擬第 72 小時後。

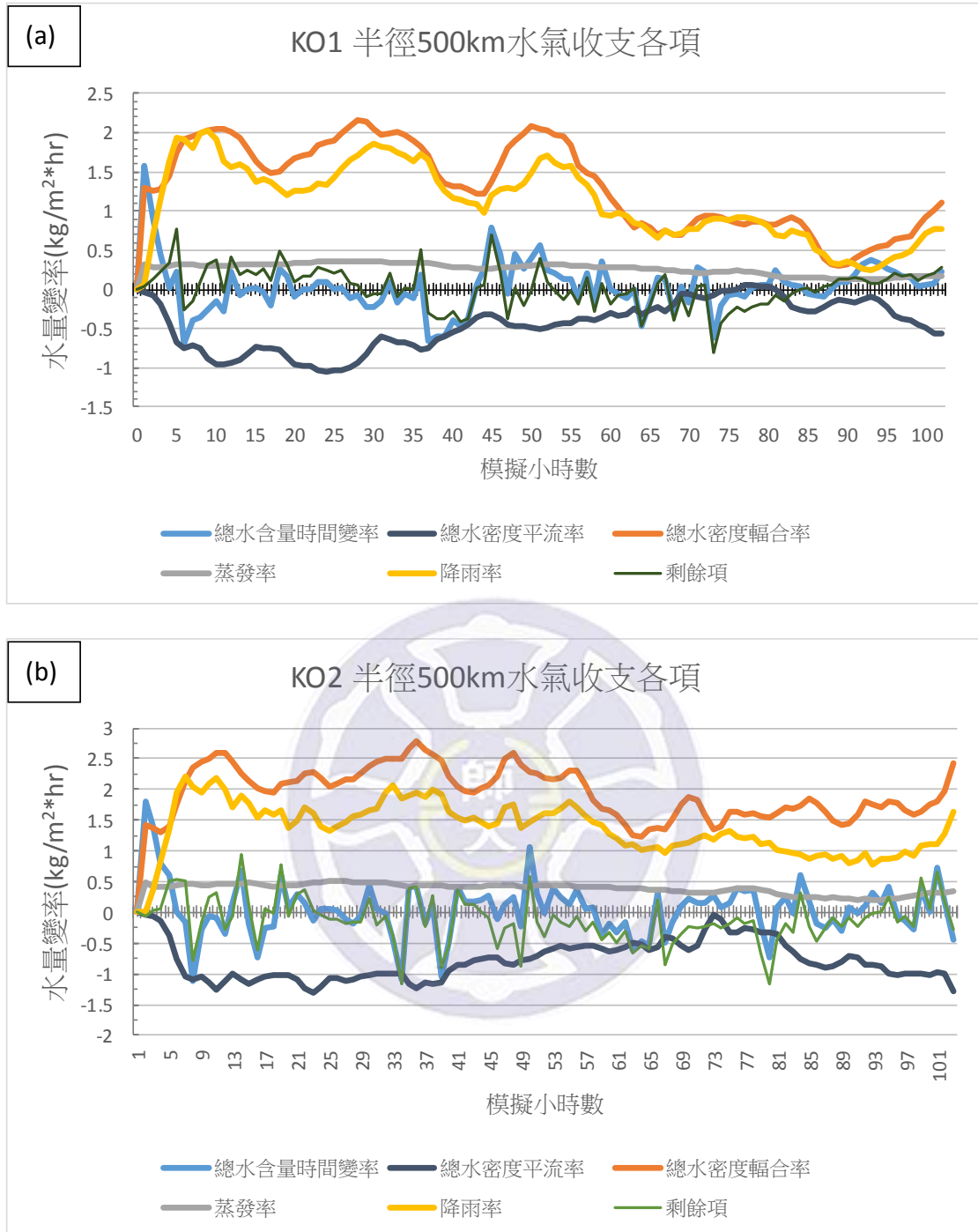


圖 6.16。半徑 500 公里內水氣收支各項逐時變化圖。(a)KO1(b)KO2(c)KO3。

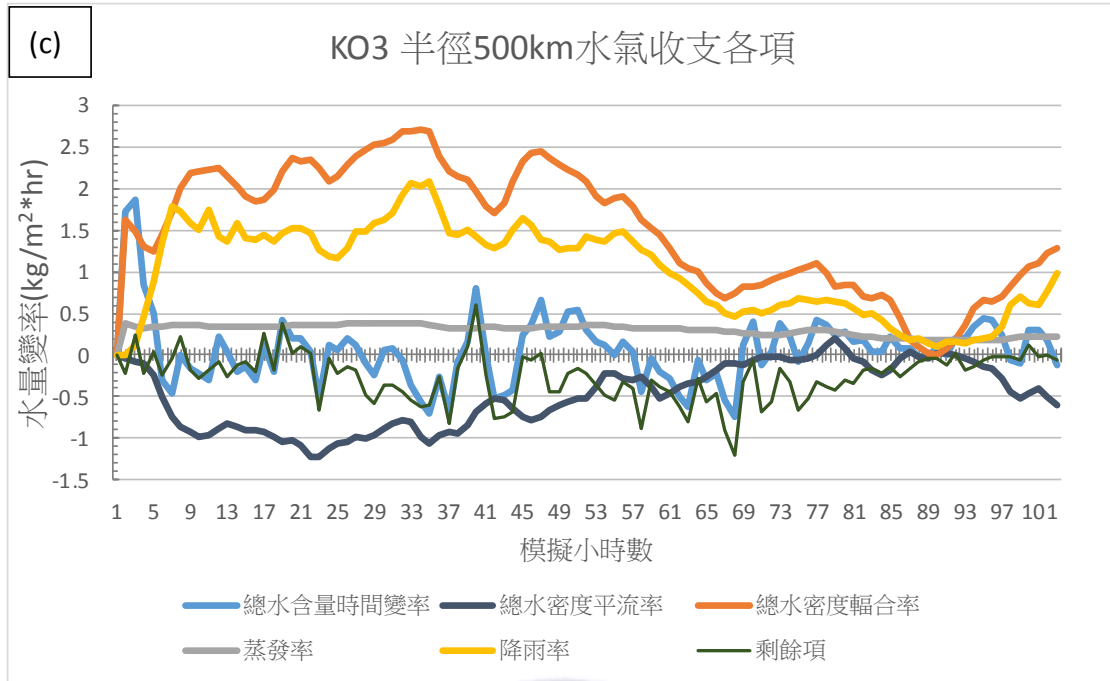


圖 6.16，完。

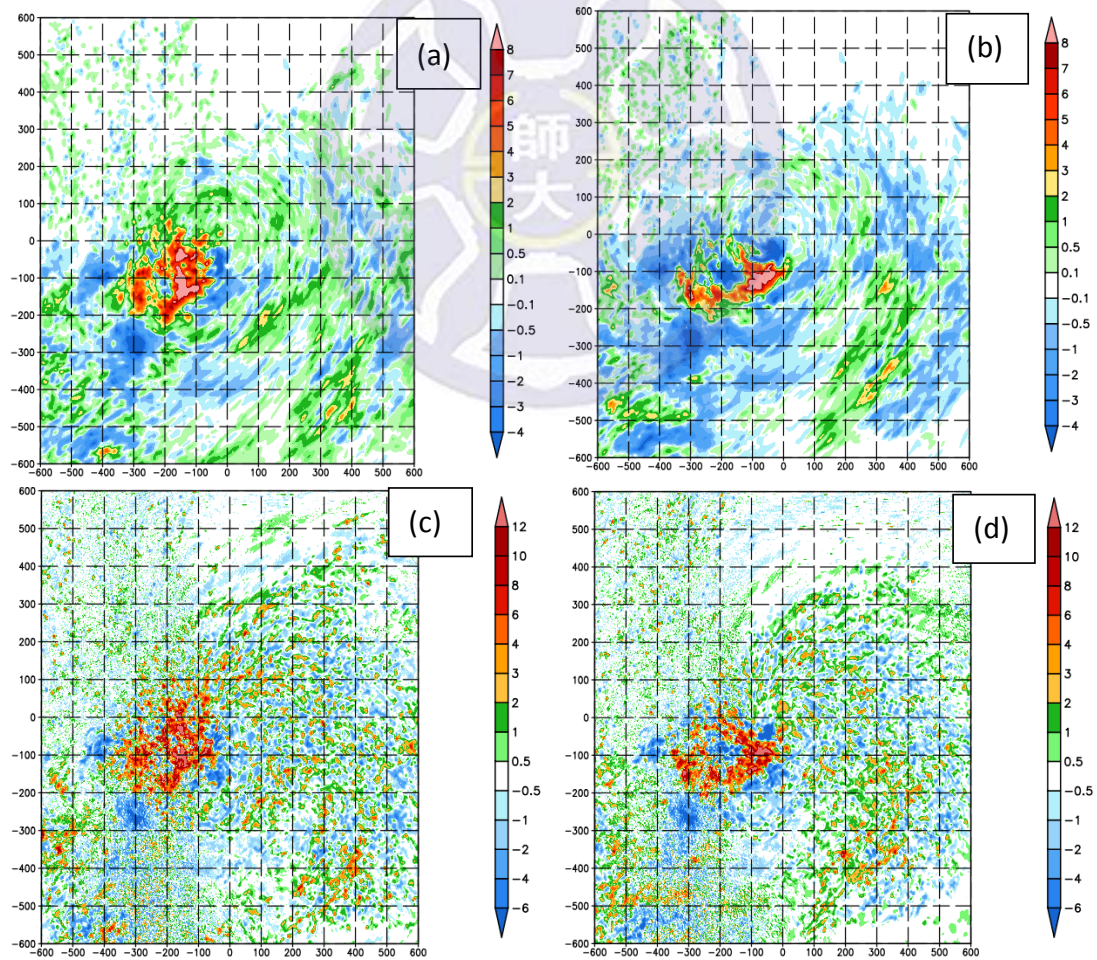


圖 6.17。(a)(b)分別為 KO2-KO1 和 KO3-KO1 的降雨強度差異(單位 mmhr⁻¹)，(c)(d)分別為 KO2-KO1 和 KO3-KO1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 kg/m²hr)。

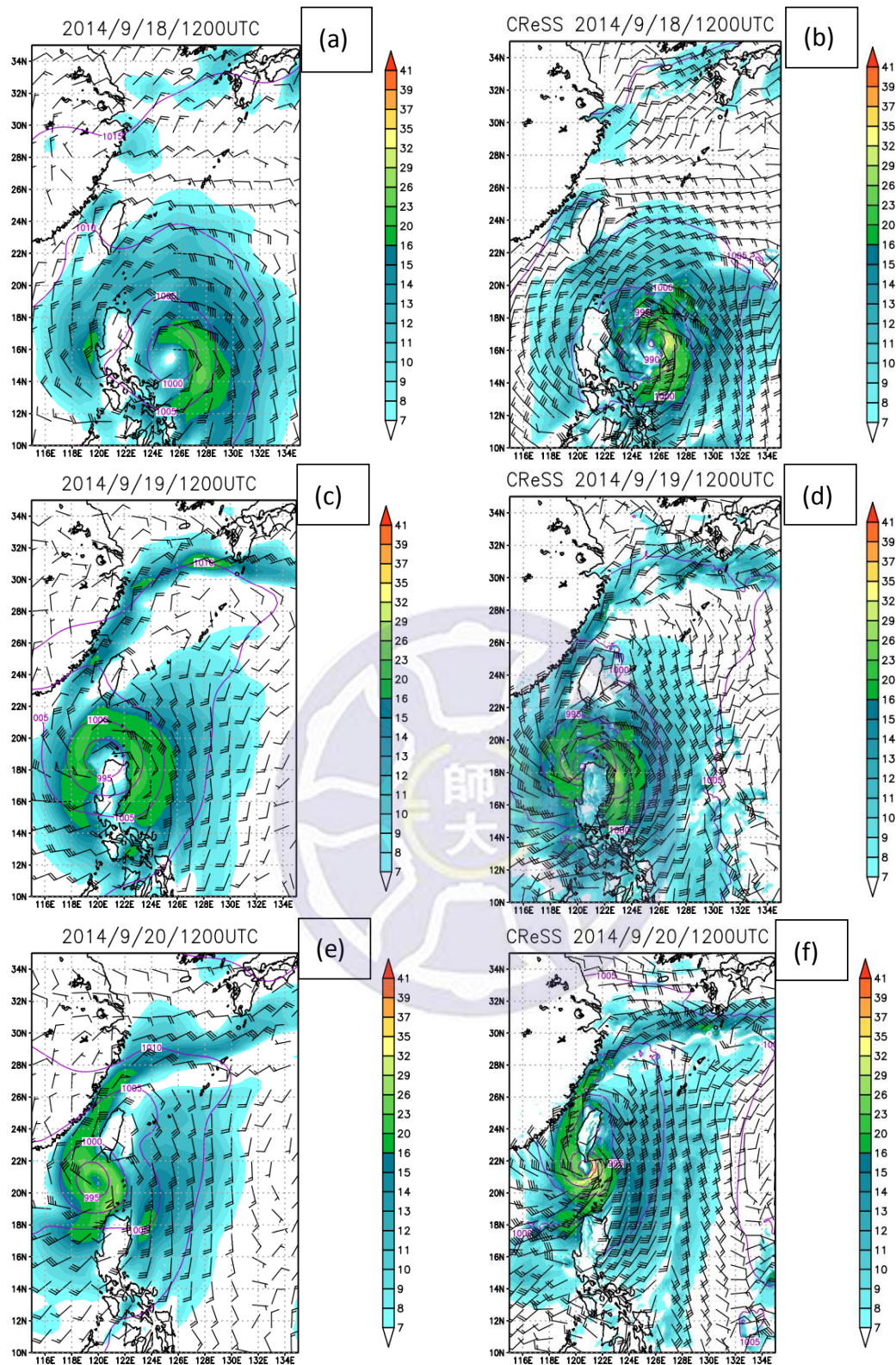


圖 7.1 待續。2014 年 9 月 18 日到 23 日之 1200 UTC，(a)(c)(e)(g)(i)(k)為 NCEP GFS 的 1000hPa 的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、風速(色階：單位 ms^{-1})、海平面氣壓(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)以及同一個時間的 CReSS(b)(d)(f)(h)(j)(l)，離地表 50m 高的風場(風標：每橫代表 10 ms^{-1})、10 公尺高的風速(色階：單位 ms^{-1})，和氣壓場(曲線：單位為 hPa，每條間隔 5 hPa)

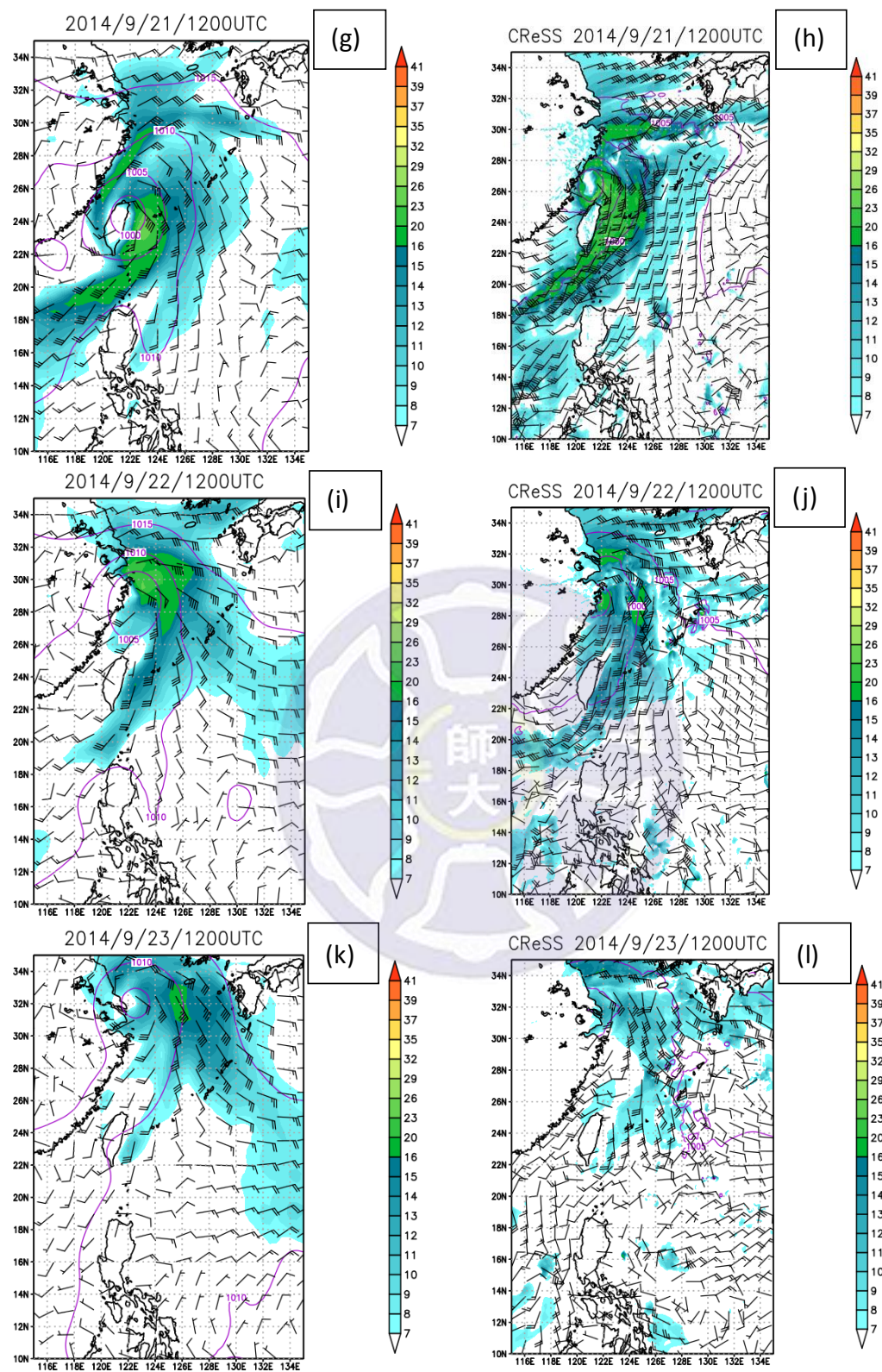


圖 7.1 完。

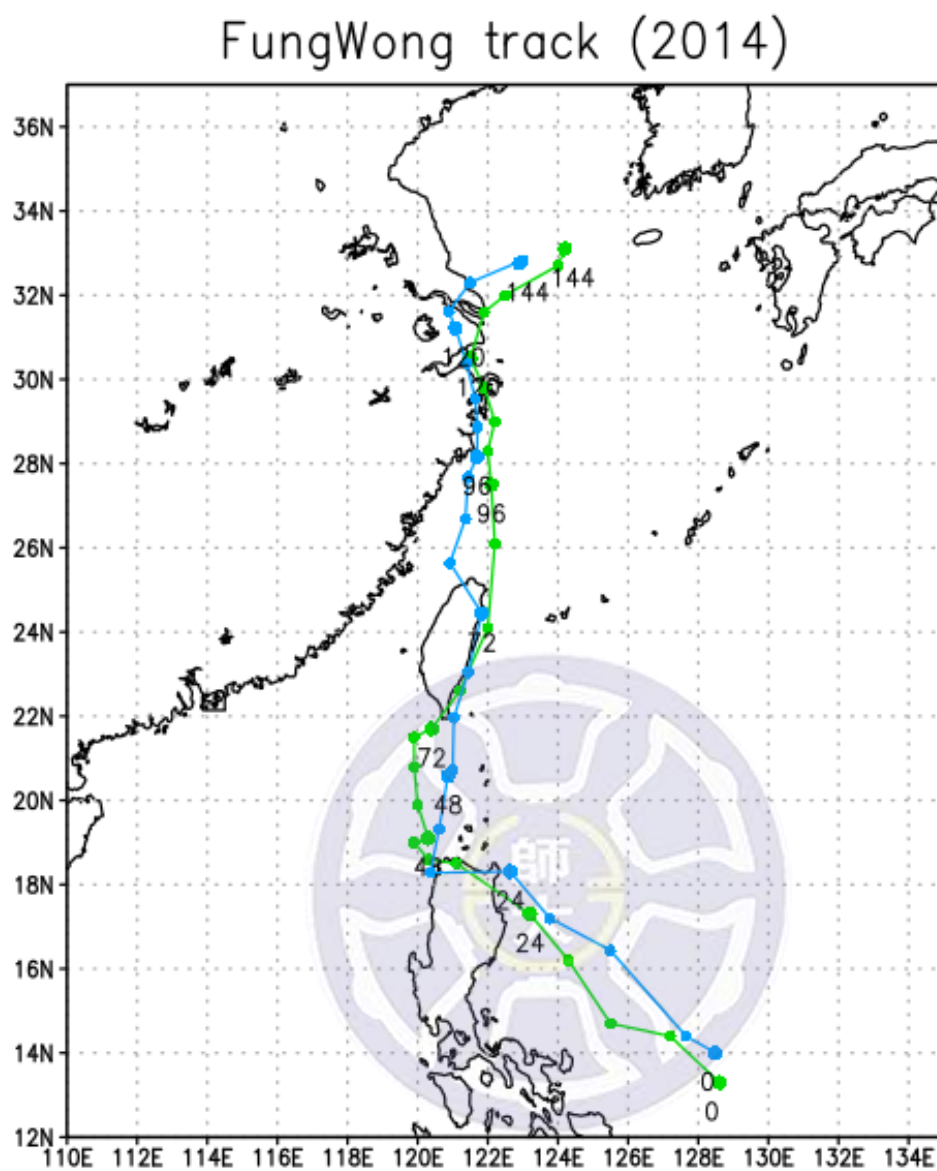


圖 7.2 鳳凰颱風之中央氣象局最佳路徑路徑和 CReSS 路徑圖，每六小時打一點，每 24 小時標記一次。時間為 2014 年 9 月 18 日 0000 UTC 到 9 月 24 日 0000 UTC(中央氣象局路徑僅到 20 日 1800 UTC)。藍色線為 FU1；綠色線為中央氣象局最佳路徑。

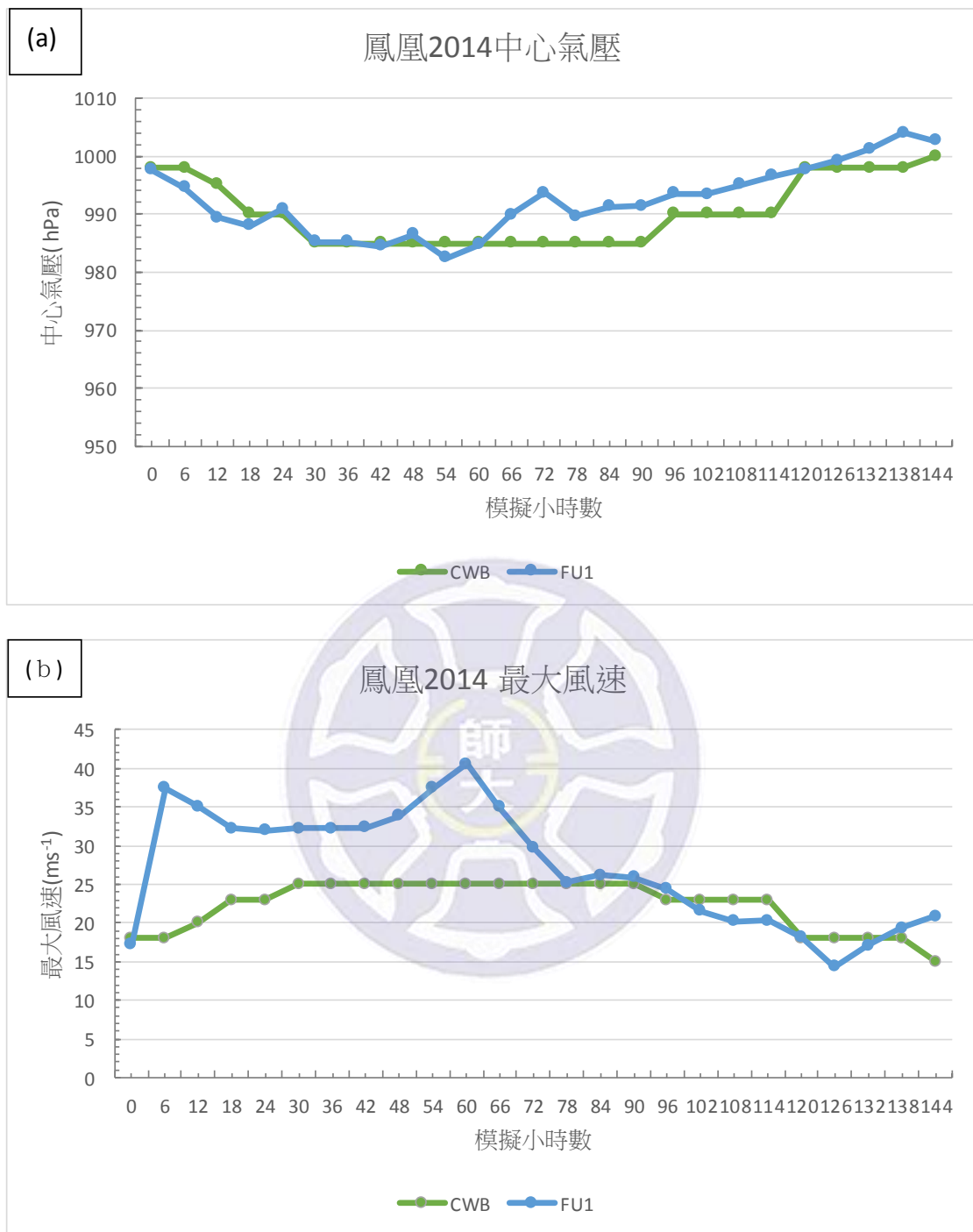


圖 7.3。為模擬 FU1 和 CWB 觀測資料之中心氣壓 (hPa)和近中心最大風速(ms^{-1})比較圖

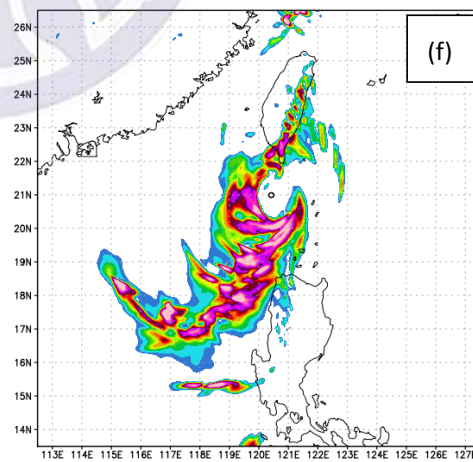
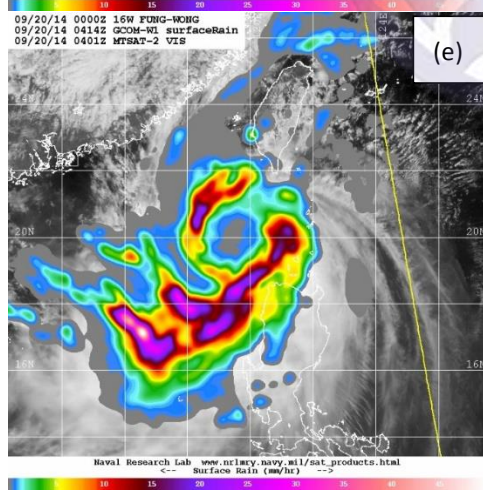
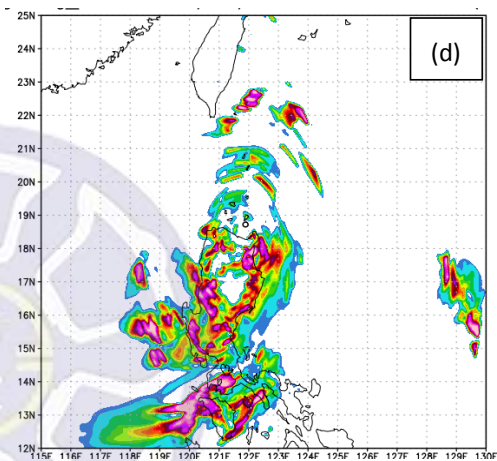
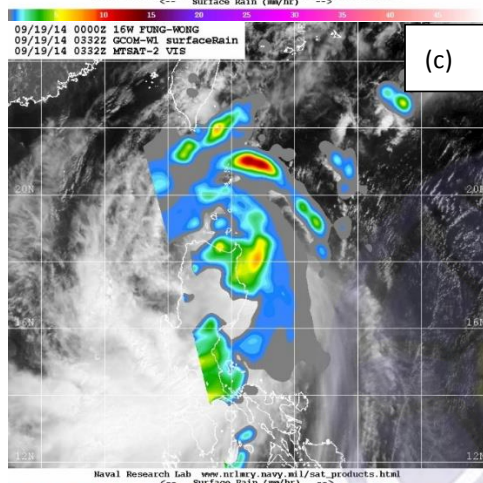
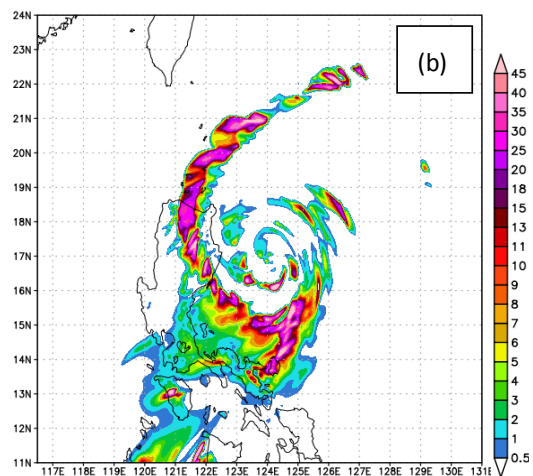
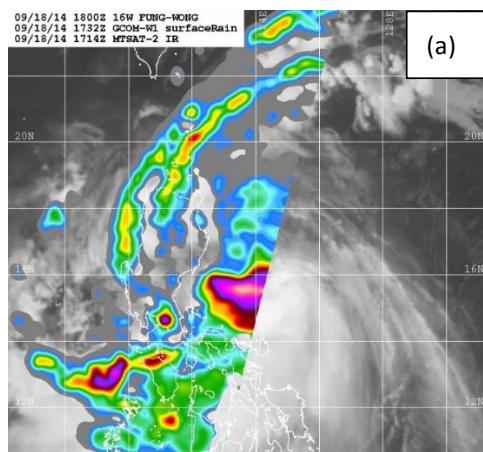


圖 4.4 續。(a)9/18 1732 UTC(c) 9/19 0332 UTC(e)9/20 0414 UTC(g)9/20 1717 UTC(i)9/22 0402 UTC 為 NRL 衛星觀測資料，(b)(d)(f)(h)(j)為相鄰時間的 FU1 模擬的資料，參數皆為降雨強度，單位為(mmhr^{-1})

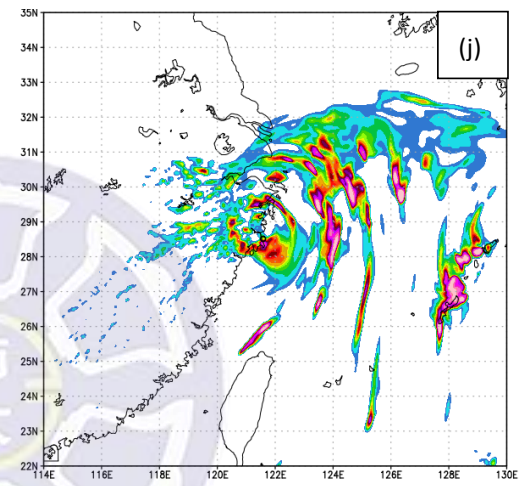
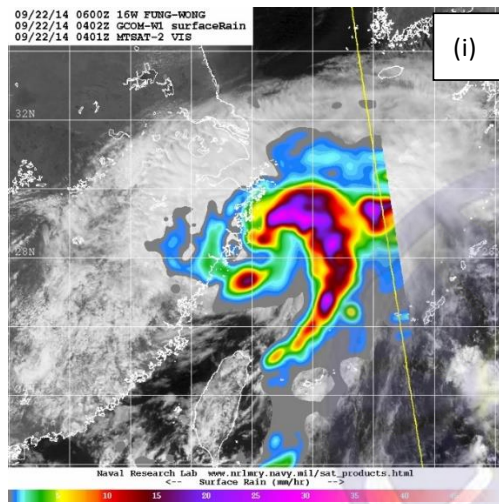
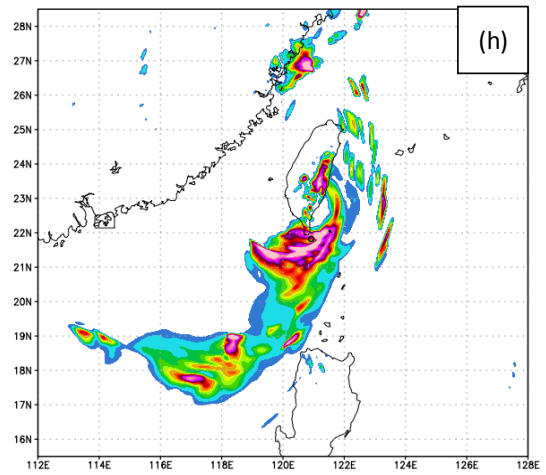
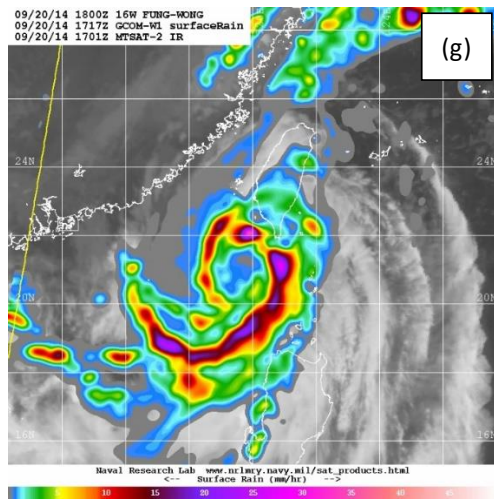


圖 7.4 完。

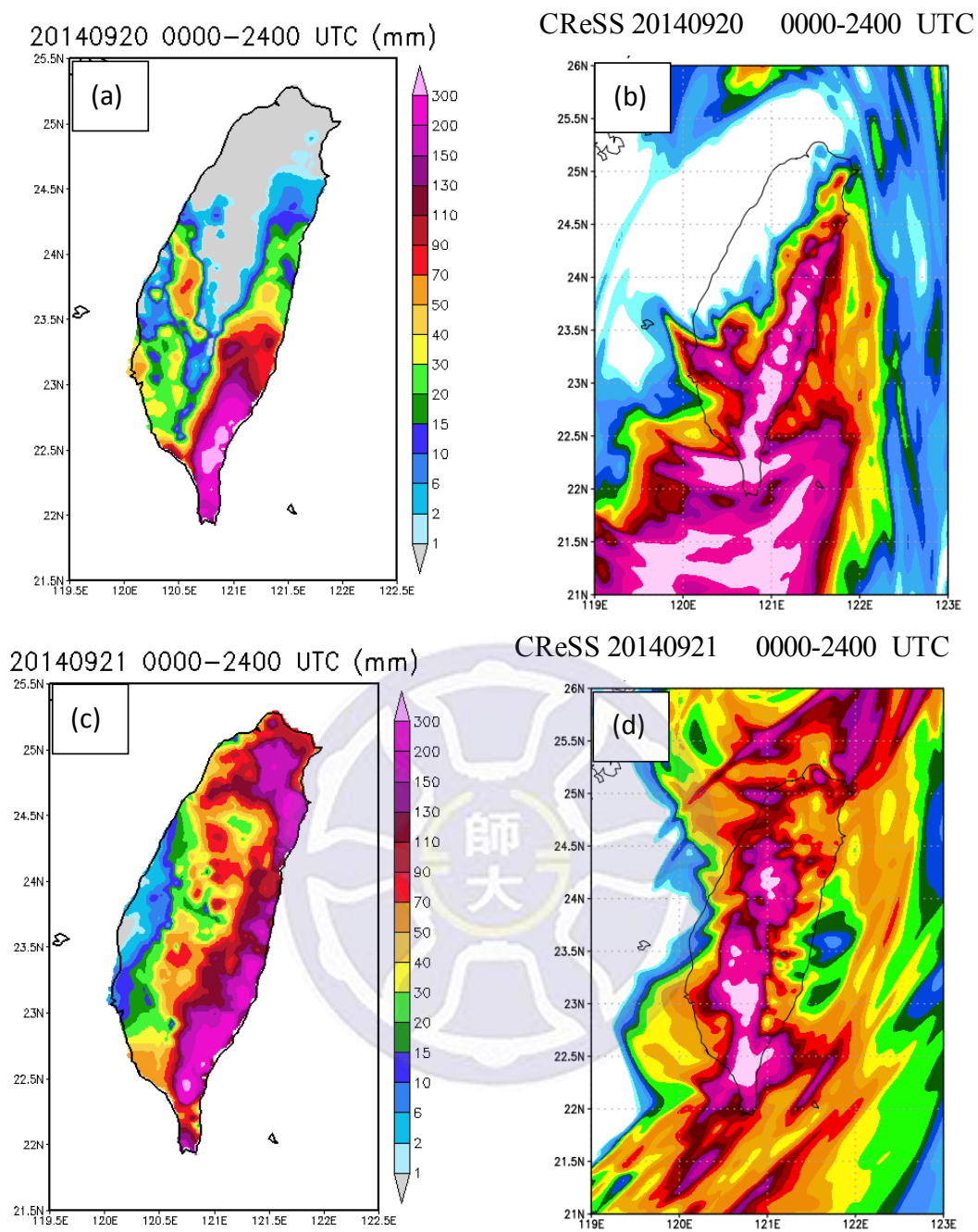
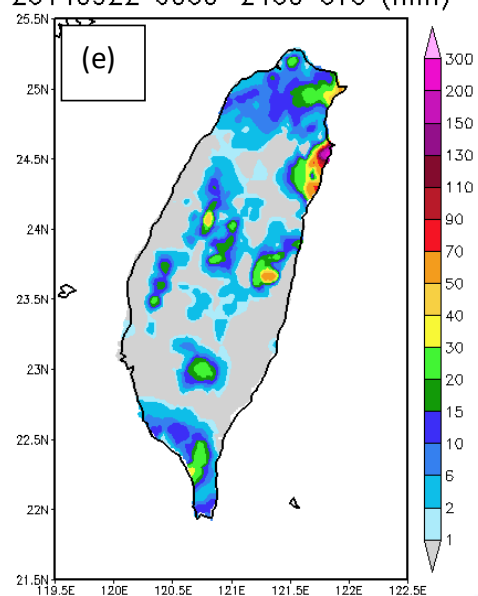
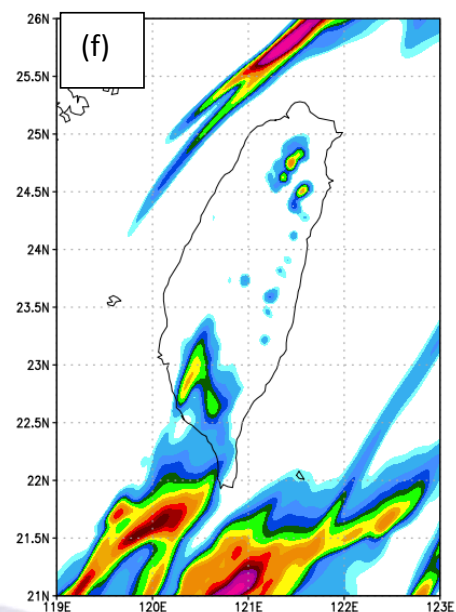


圖 7.5 為 2014 年 9 月 20 日到 22 日之台灣地區日累積降雨和 72 小時累積降雨。(a)(c)(e)為觀測日累積降雨；(b)(d)(f)為 CReSS 日累積降雨。(g)為 CWB72 小時累積降雨；(h)為模式 72 小時累積降雨

20140922 0000-2400 UTC (mm)



CReSS 20140922 0000-2400 UTC



CReSS 20140920-22 2400 UTC

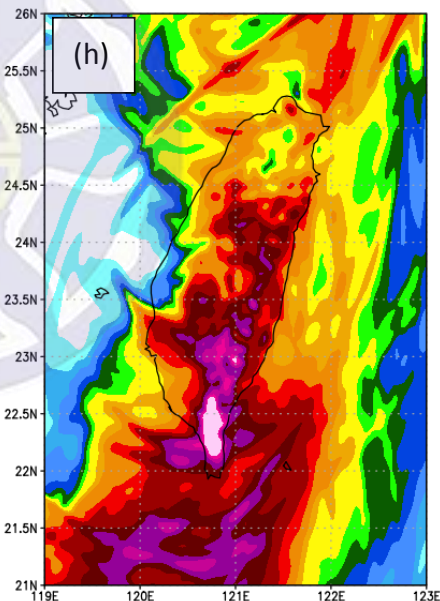
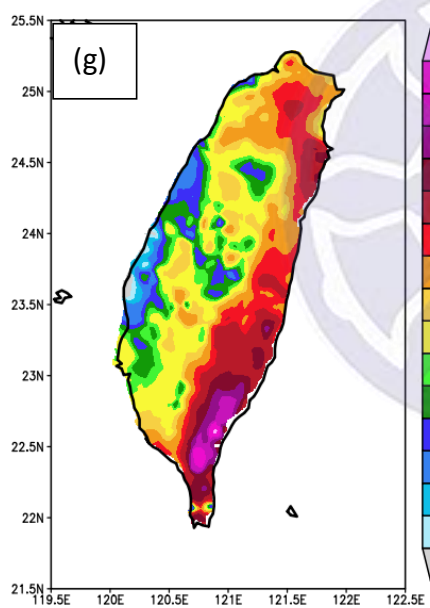


圖 7.5 完。

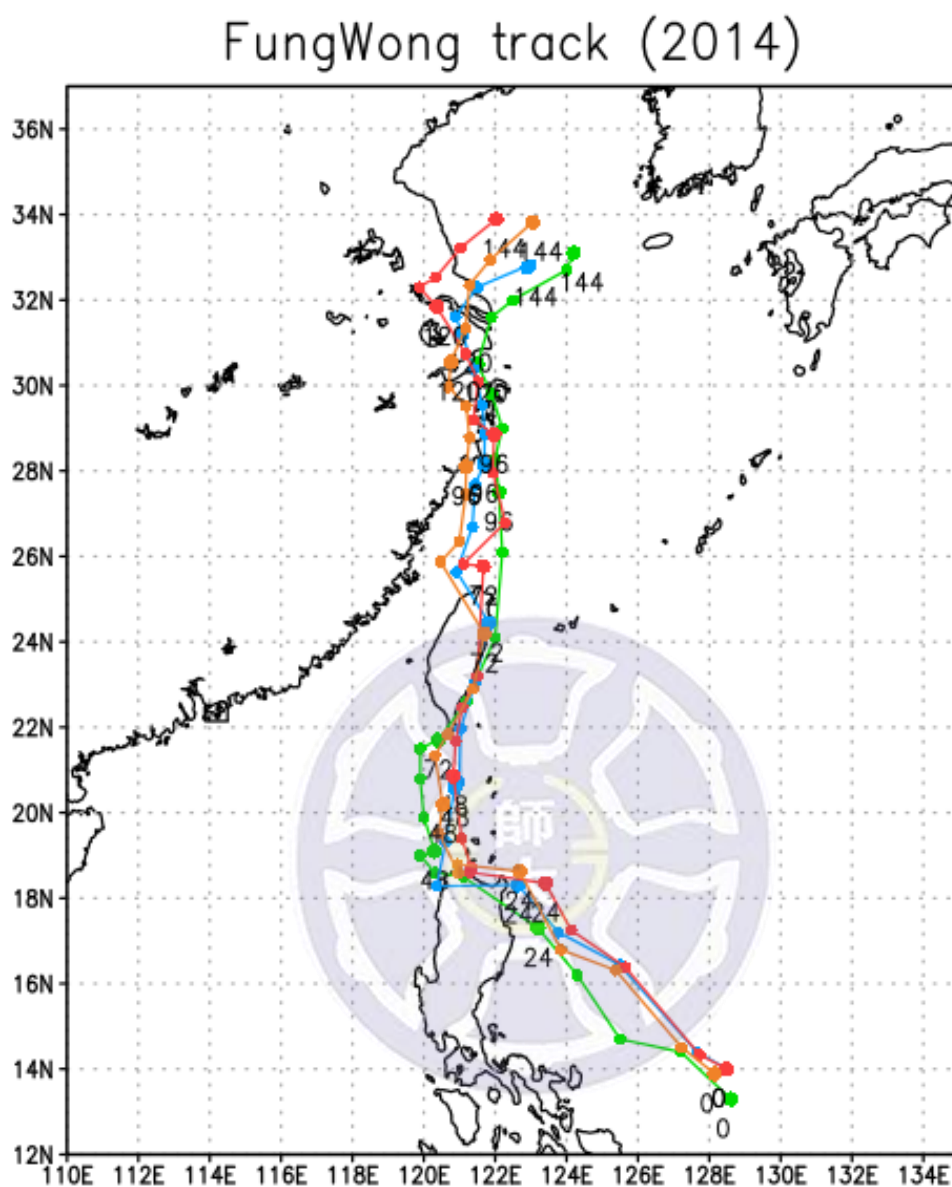


圖 7.6 為鳳凰颱風之觀測和模擬路徑圖。綠色為 CWB 路徑，藍色為 FU1 路徑，橘色為 FU2 路徑，紅色為 FU3 路徑。每 6 小時一筆，每 24 小時標記數字。

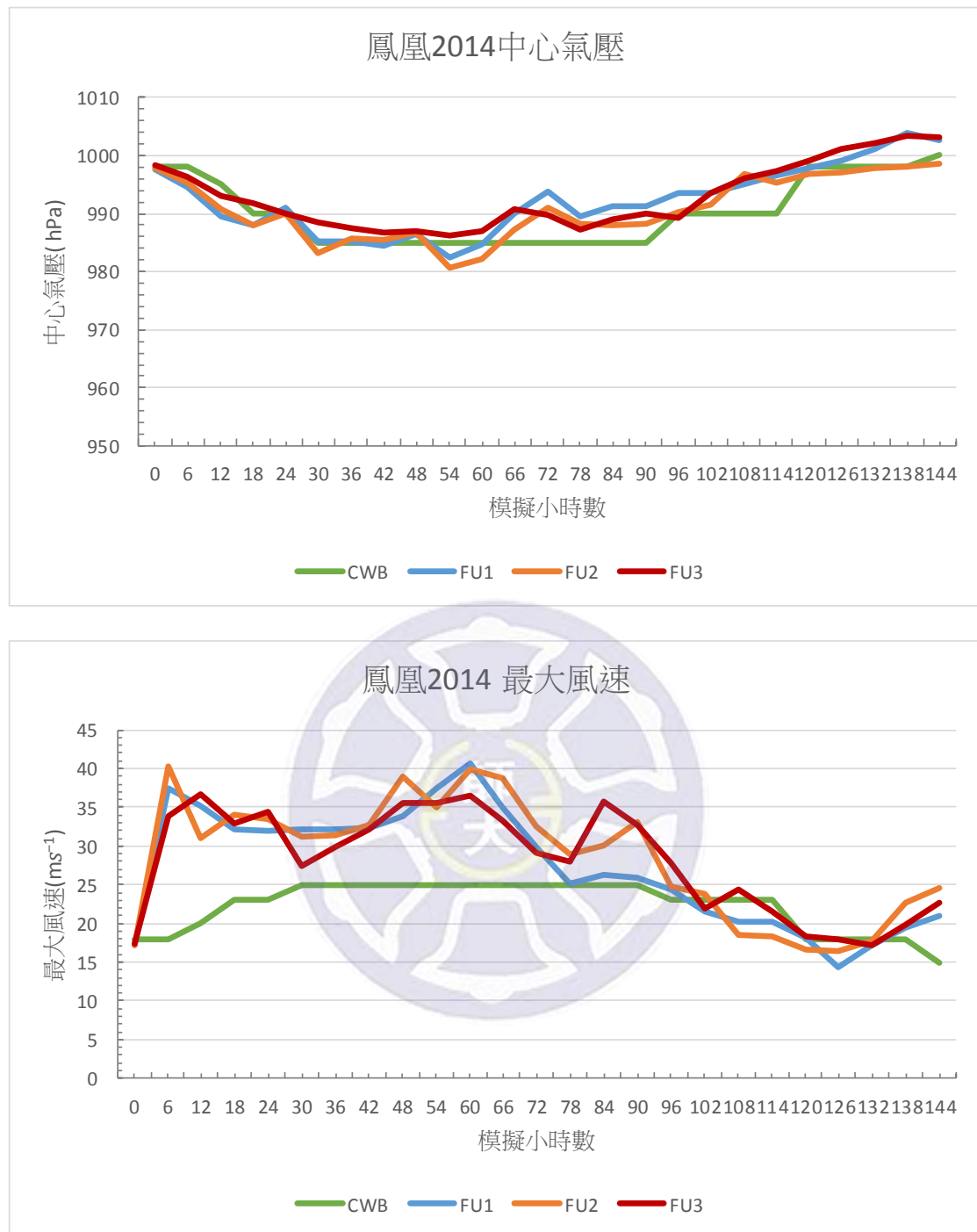


圖 7.7 為模擬 FU1、FU2、FU3 和 CWB 觀測資料之中心氣壓(hPa)和近中心最大風速(ms^{-1})比較圖。

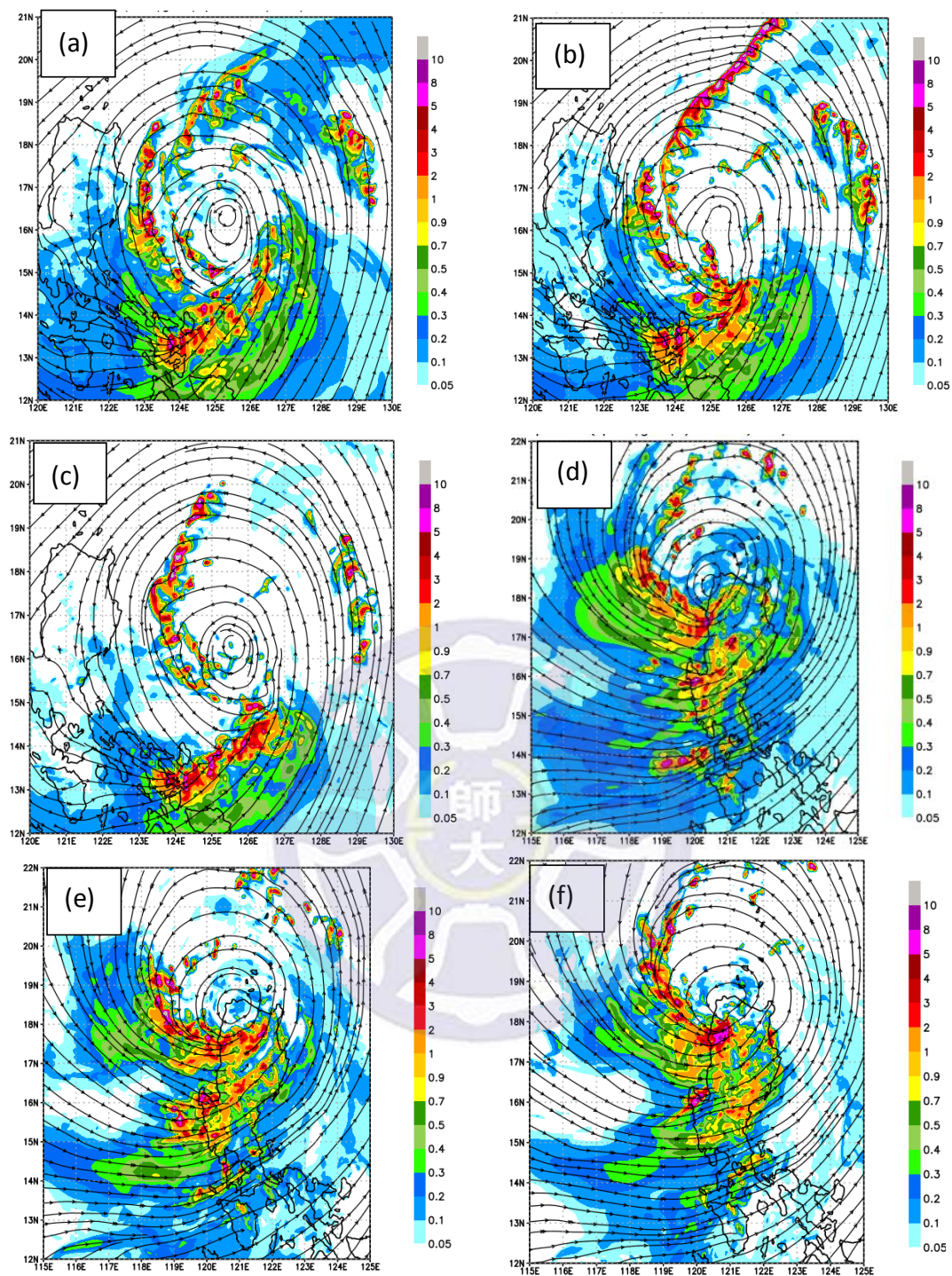


圖 7.8 為鳳凰颱風之 9 月 18 日 1200 UTC：(a)(b)(c)，分別為 FU1、FU2、FU3 依此順序類推；9 月 19 日 0000 UTC：(d)(e)(f)；9 月 20 日 0000 UTC：(g)(h)(i)；9 月 21 日 0000 UTC：(j)(k)(l) 的 CReSS 模式輸出之降水粒子(雨、雪、雹)的混和比於垂直方向加總。單位為(gkg^{-1})

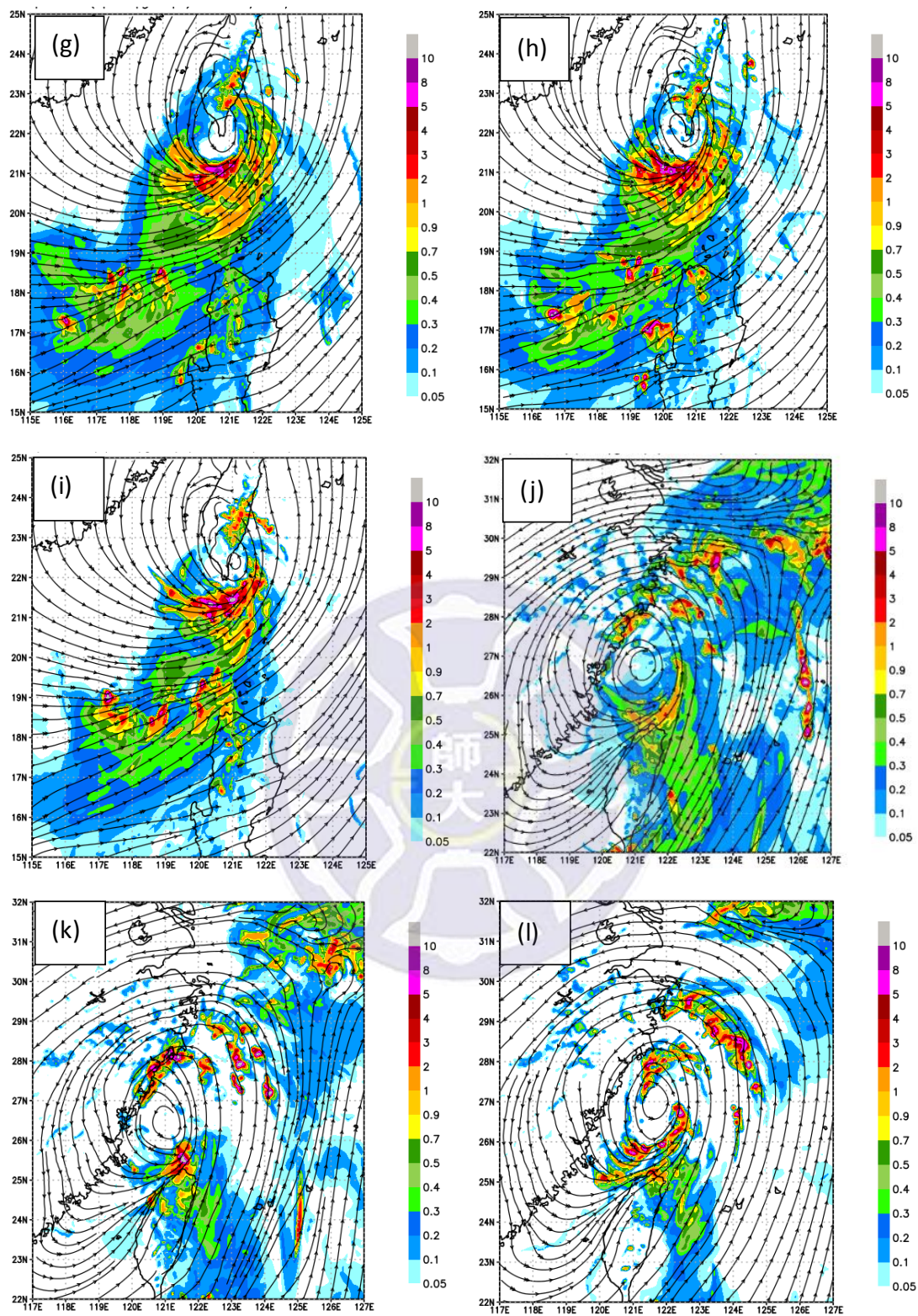


圖 7.8。

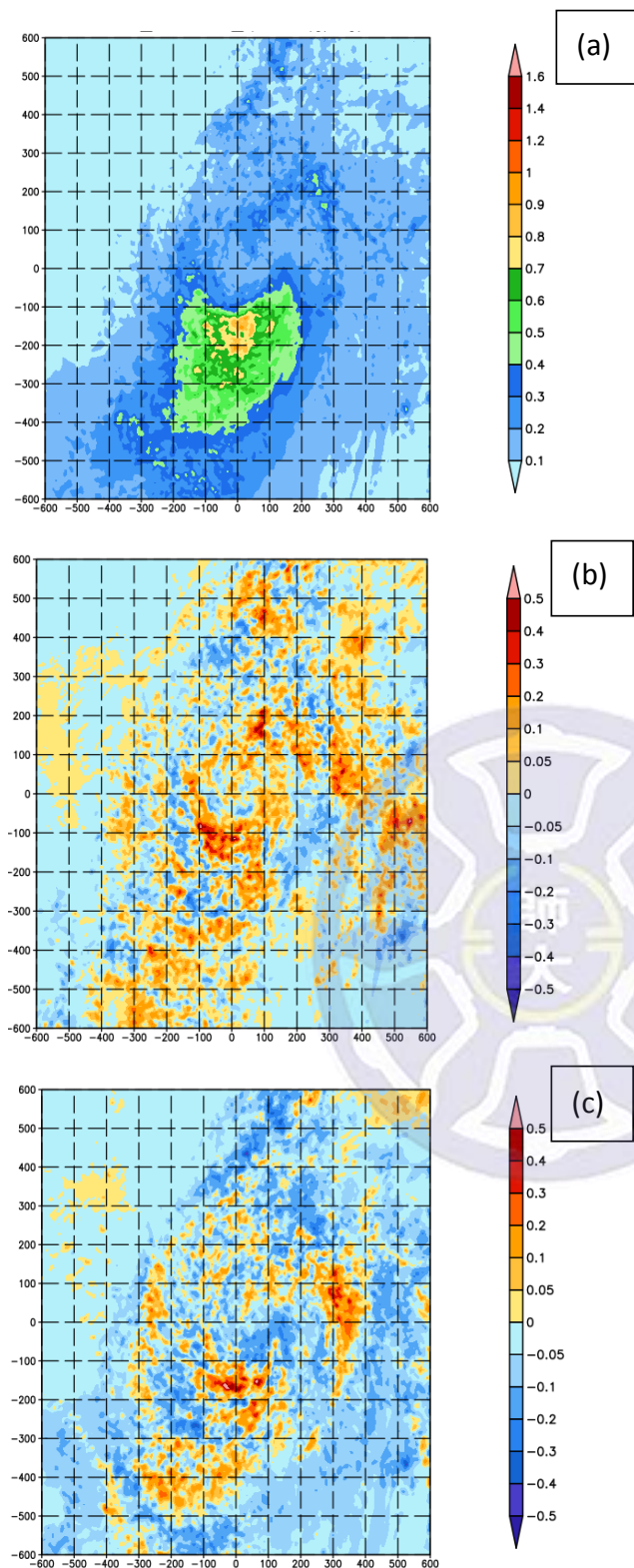


圖 7.9 為鳳凰颱風生命週期(9 月 18 日 0000 UTC 到 24 日 0000 UTC，共 144 小時)之降水粒子(雨、雪、雹)之(a)FU1 混合比(b)FU2-FU1 之混合差異比(c)FU3-FU1 之混合差異比。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)。

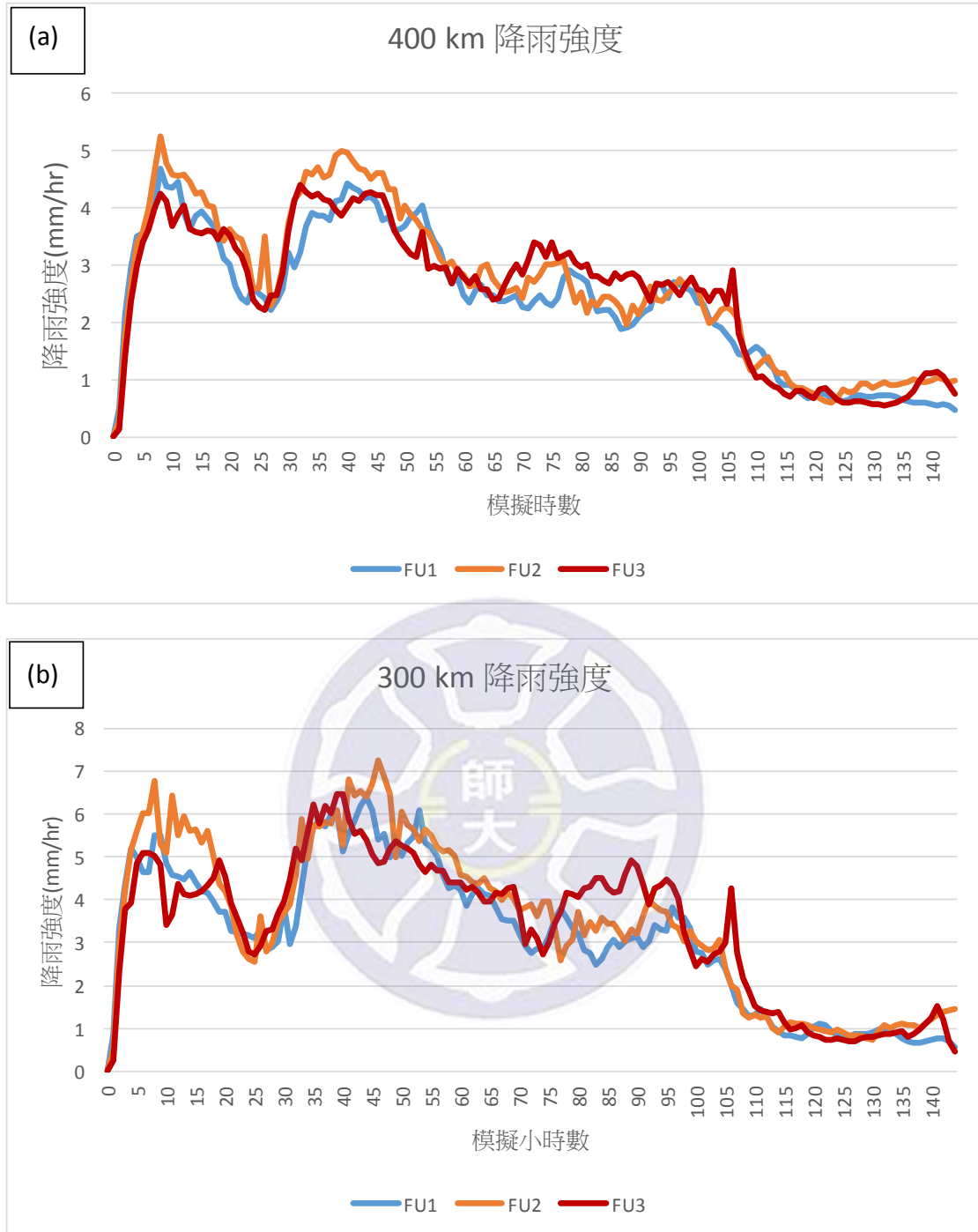


圖 7.10。為鳳凰颱風在 400、300、200 半徑內取格點平均的逐時降雨強度比較圖。藍色為 FU1、橘色為 FU2、紅色為 FU3。

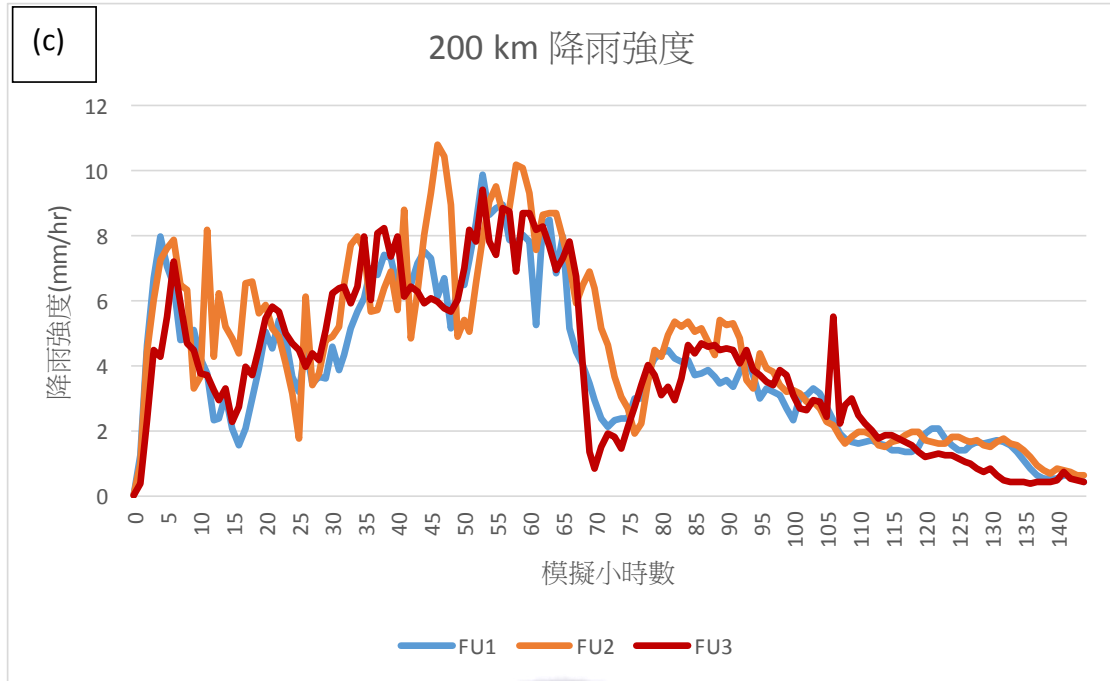


圖 7.10。完。



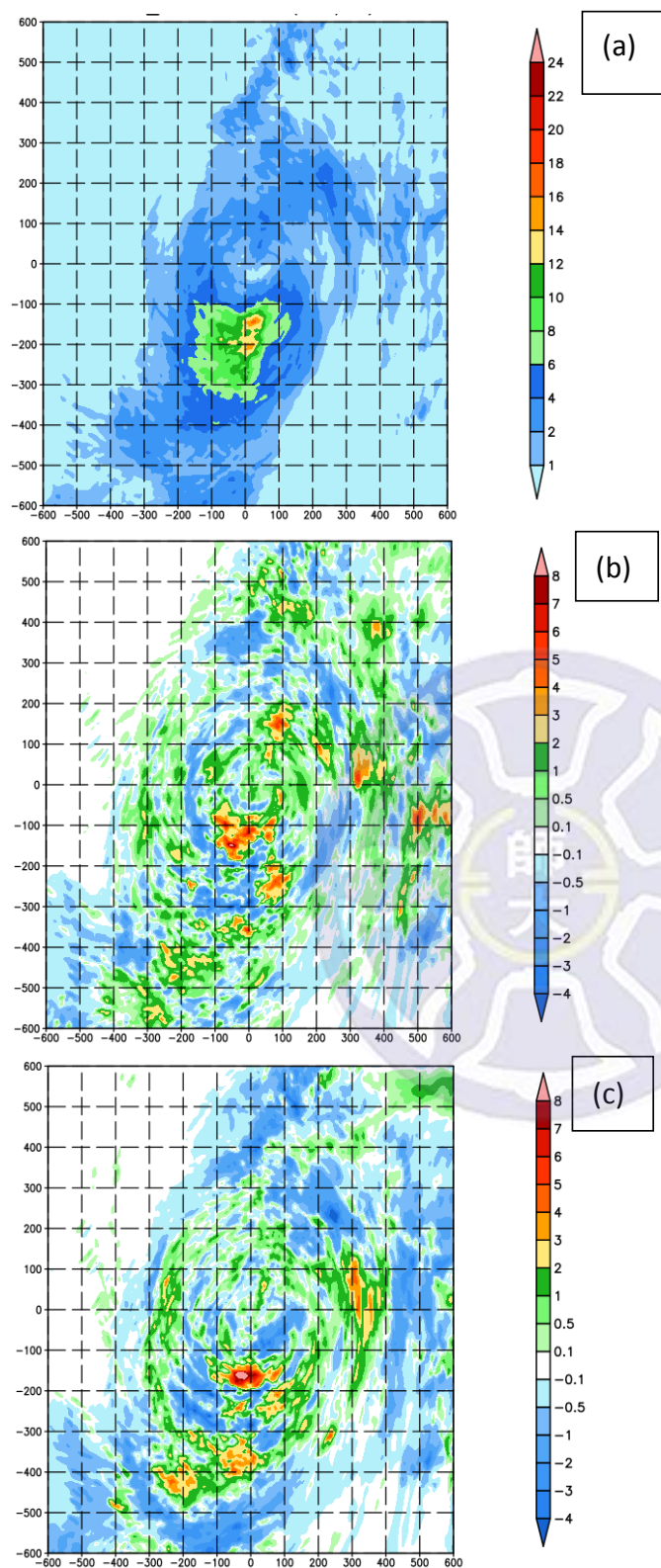


圖 7.11 鳳凰颱風生命週期(9 月 18 日 0000 UTC 到 24 日 0000 UTC，共 102 小時)之降雨強度，單位(mmhr⁻¹)。 (a)FU1(b)FU2-FU1 之降雨強度差異(c)FU3-FU1 之降雨強度差異。X，Y 軸為離中心點的距離(單位：公里)。

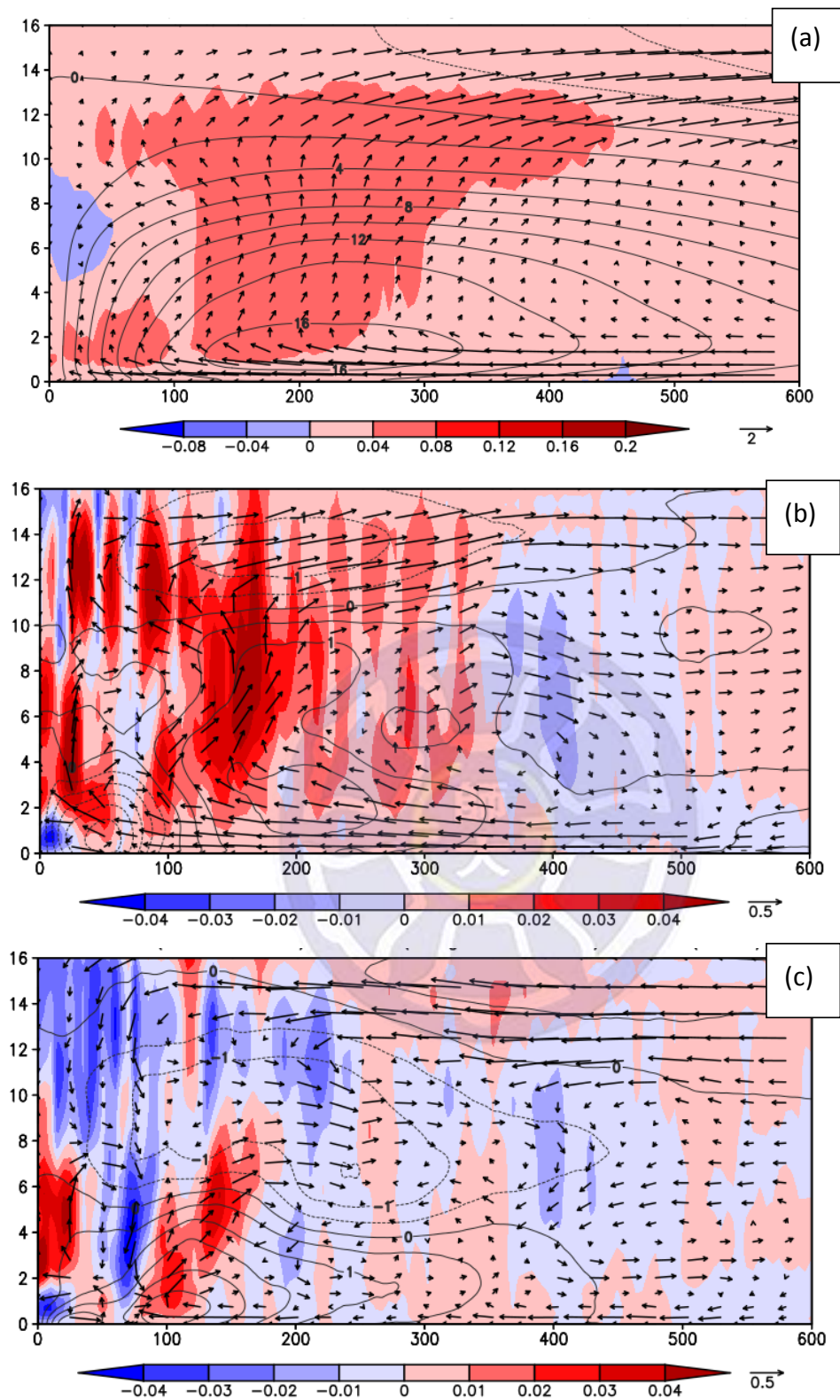


圖 7.12 凰颱風 9 月 18 日 0000 UTC 到 24 日 0000 UTC 之軸對稱圖。X 軸為到颱風中心點的距離，Y 軸為到地表的距離，單位為公里。參數為：平均切向風(ms^{-1})，等值線標示，(a)間距為 2；(b)(c)間距為 0.5)、垂直分量(色階，單位為 10 ms^{-1})、環流(徑向風和垂直速度，為箭頭標示)。(a)為 FU1(b)FU2-FU1(c)FU3-FU1。

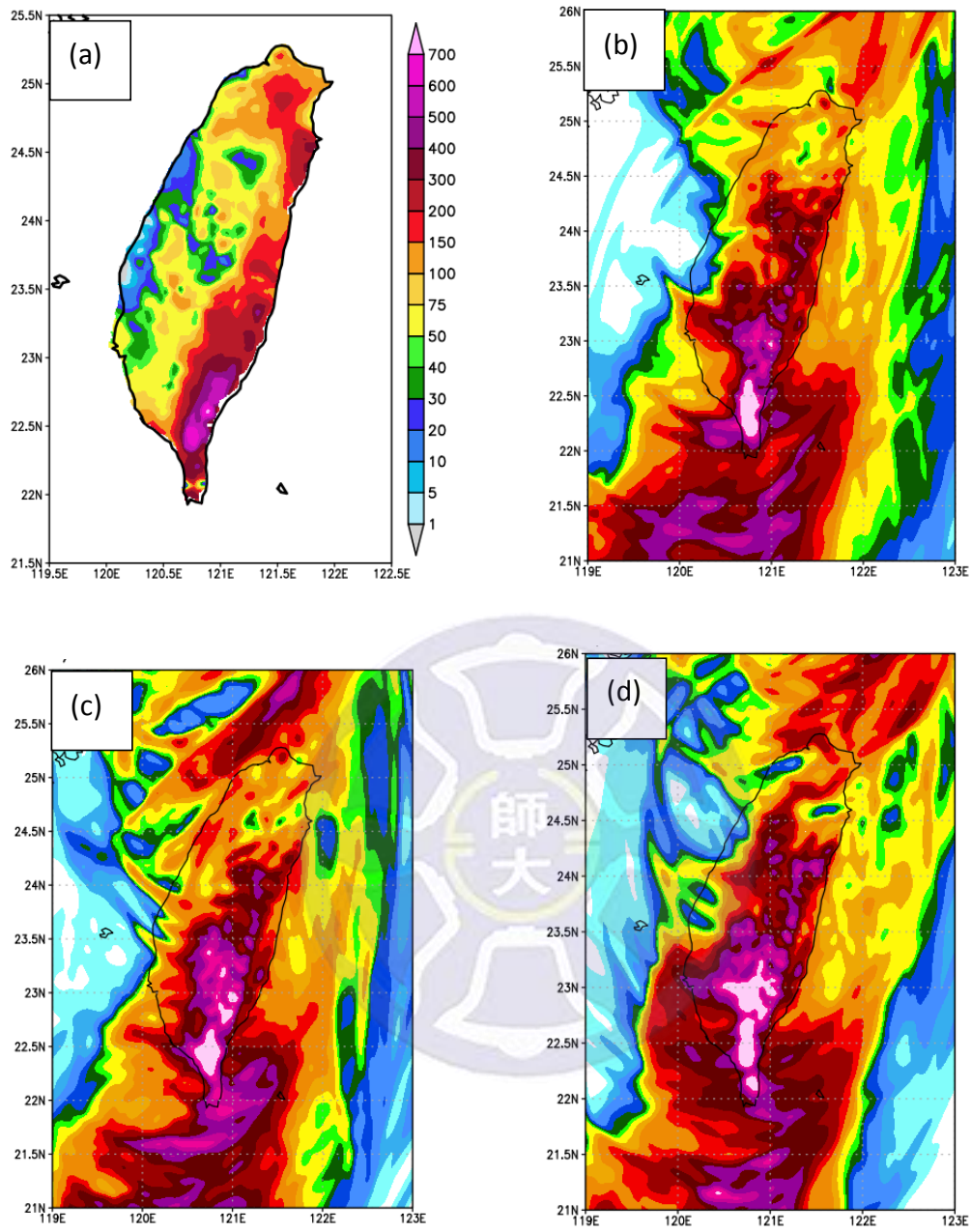


圖 7.13。9 月 20 日 0000 UTC 到 9 月 22 日 0000 UTC 之 48 小時累積雨量圖。單位為 mm，4 張圖色階都相同。(a)CWB(b)FU1(c)FU2(d)FU3。

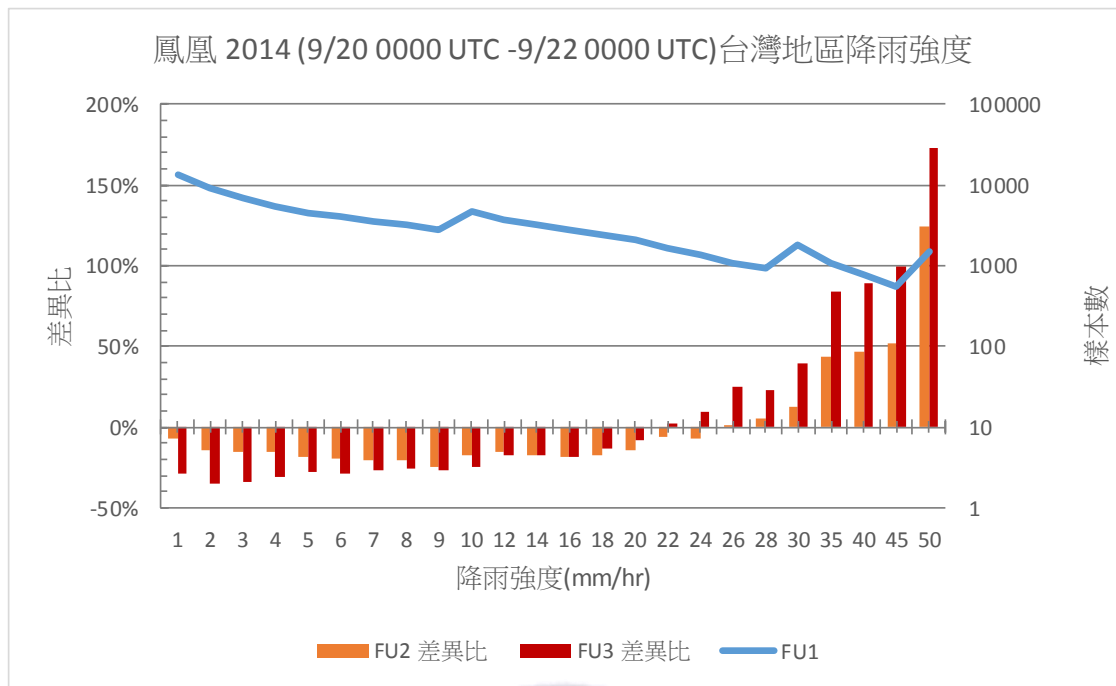


圖 7.14。台灣地區 9 月 20 日 0000 UTC 到 22 日 0000 UTC 之降雨強度樣本數和差異比。



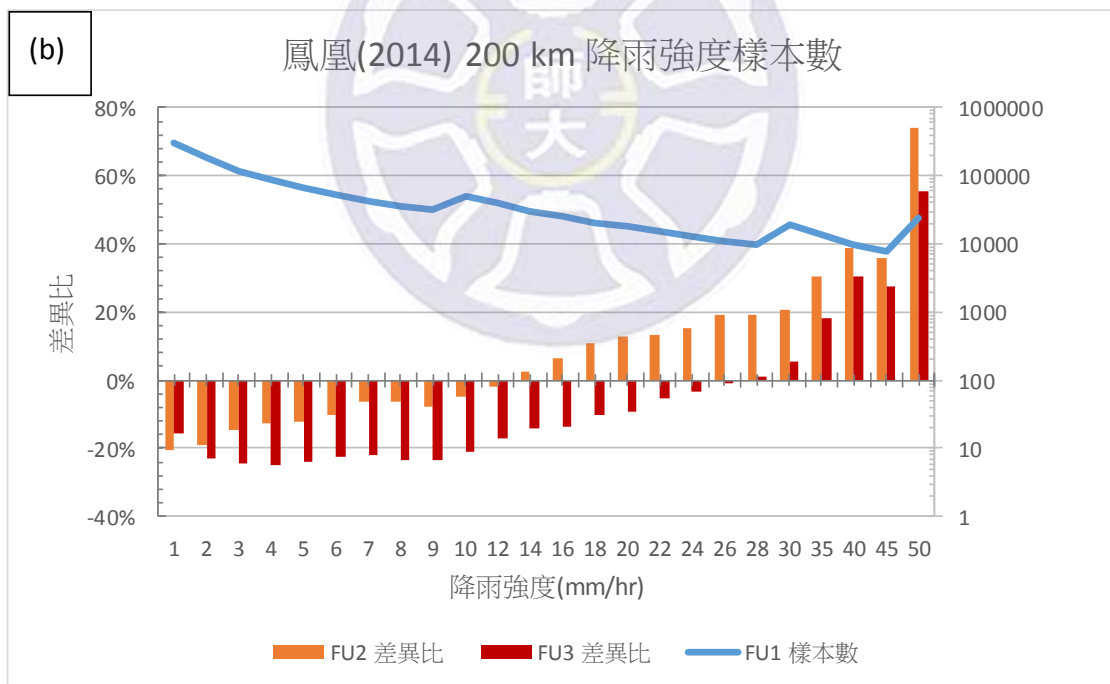
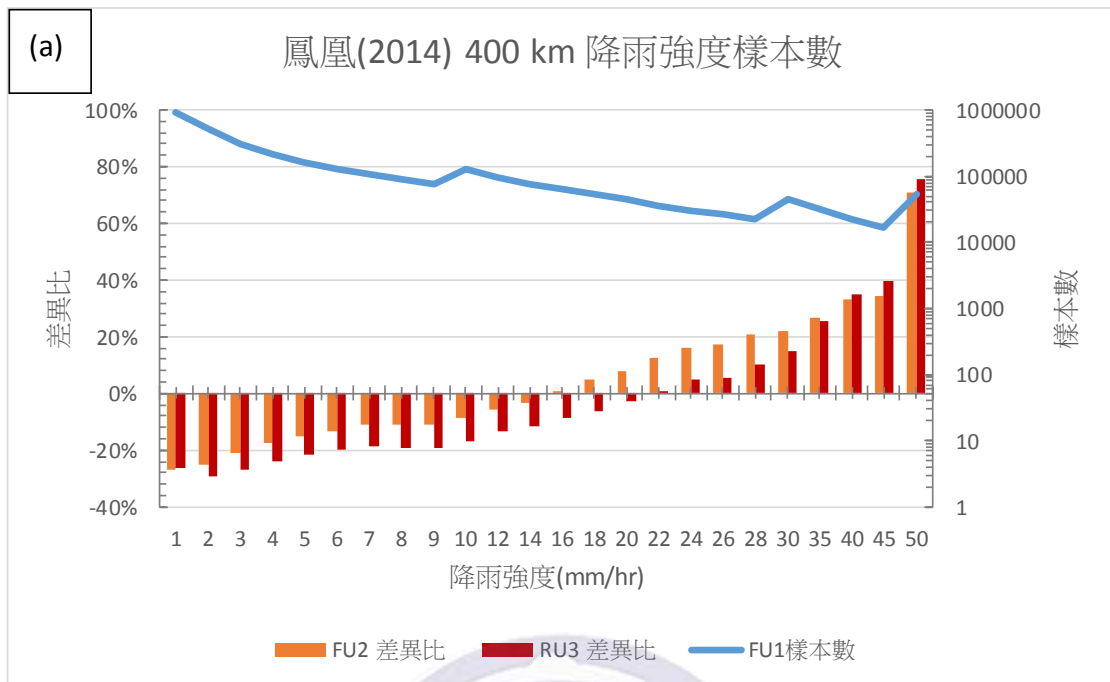


圖 7.15。為取 400 公里、200 公里內的降水格點的比較圖。每一個格點就是一個樣本。藍色線為 FU1 樣本數，其坐標軸為右方；橘色為 FU2-FU1 的差異比，紅色為 FU3-FU1 的差異比，坐標軸為左方。

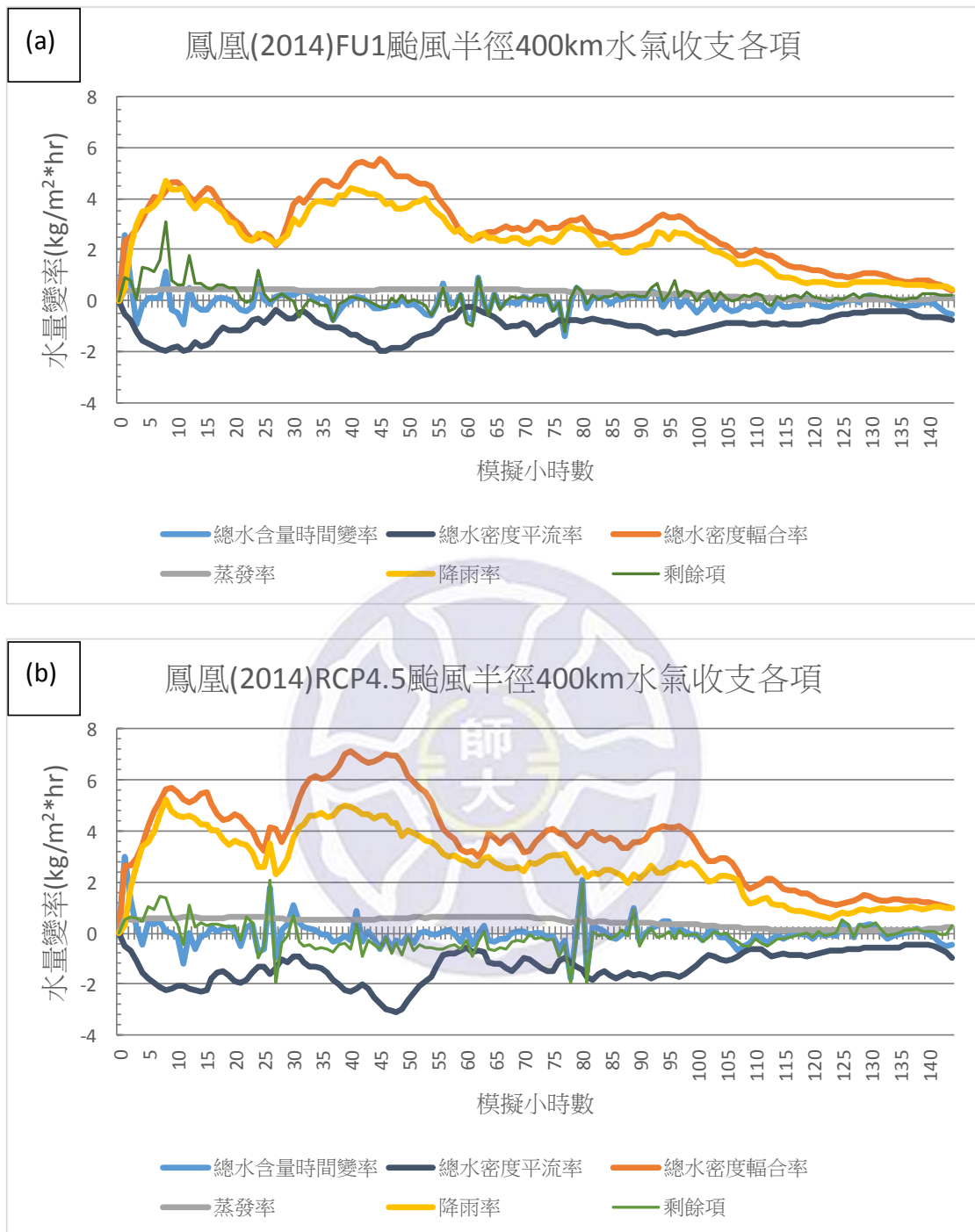


圖 7.16 待續。半徑 400 公里內水氣收支各項逐時變化圖。(a)FU1(b)FU2(c)FU3。

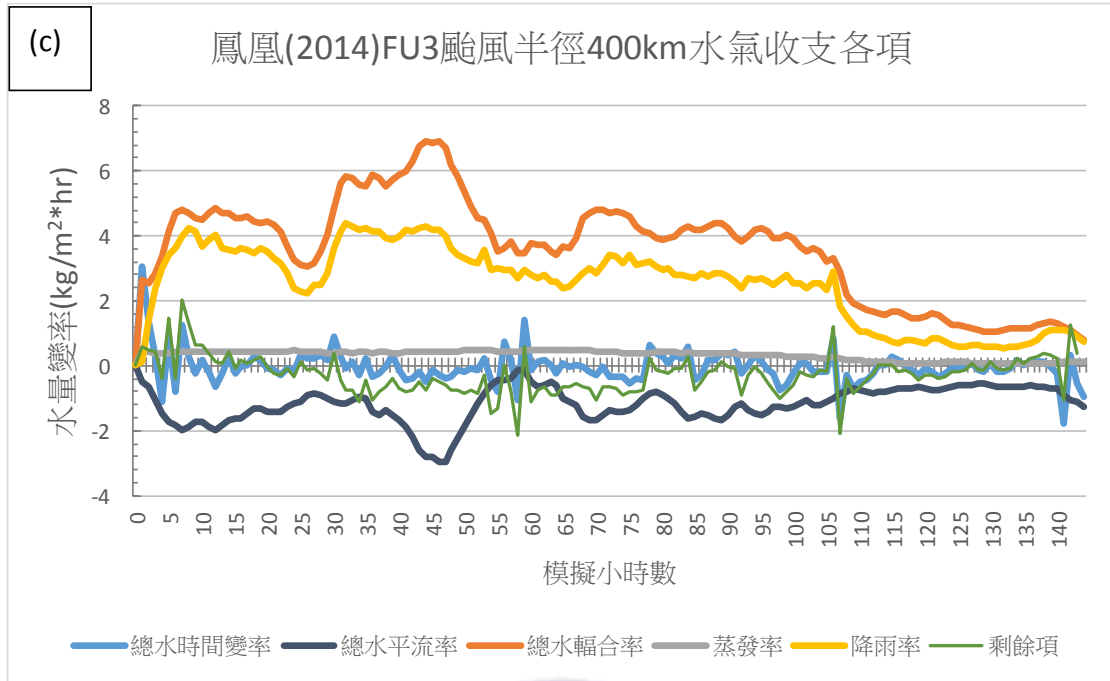


圖 7.15。完。

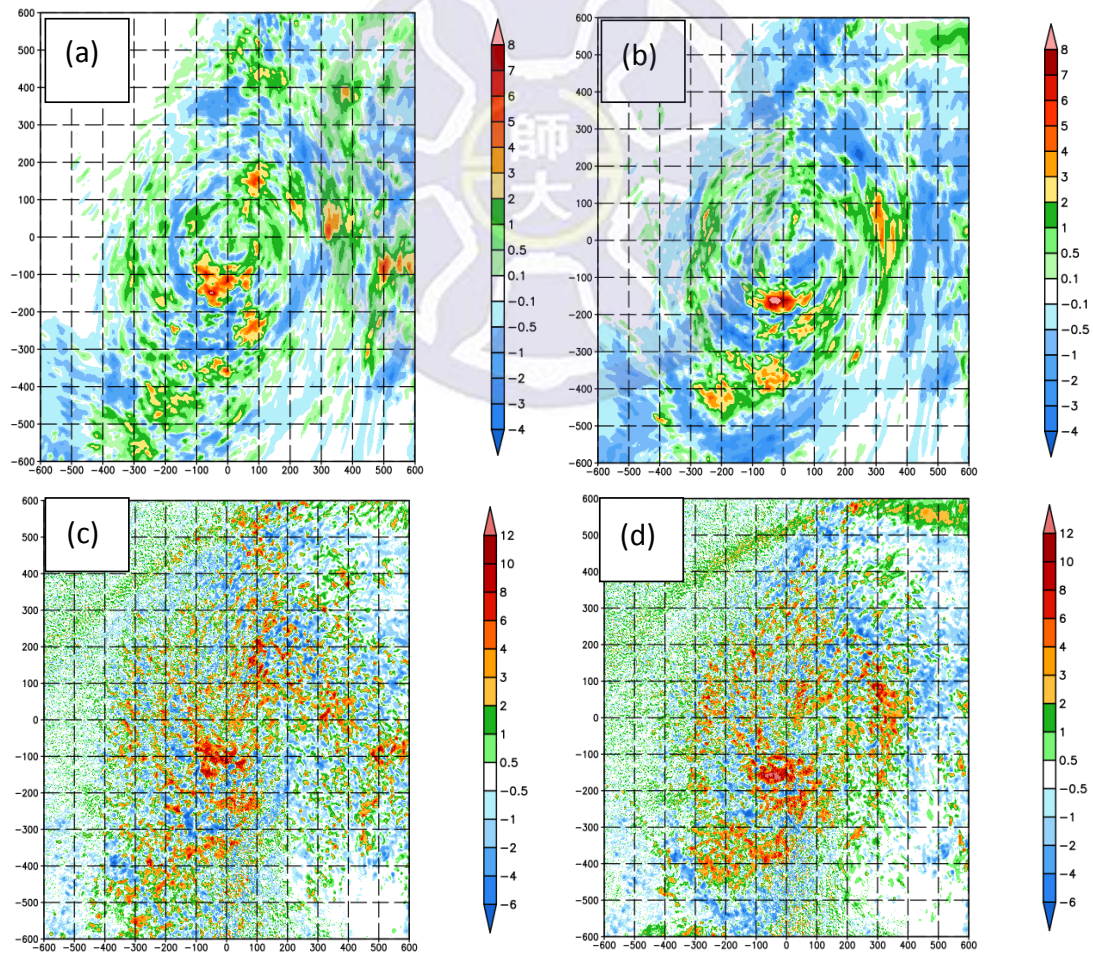


圖 7.17(a)(b)分別為 FU2-FU1 和 FU3-FU1 的降雨強度差異(單位 mmhr^{-1})，(c)(d)分別為 FU2-FU1 和 FU3-FU1 的水氣密度通量輻合率的差異(單位為 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)。

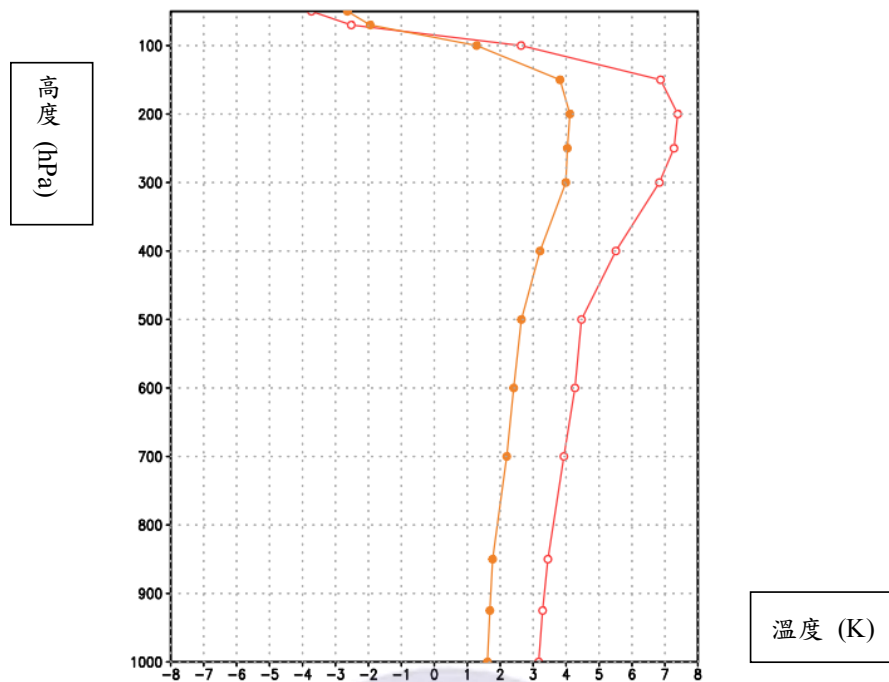


圖 8.1，為 RCP4.5(橘色)和 RCP8.5(紅色)，在垂直方向的平均增溫率，選取範圍為 110 到 150E、5 到 25N。

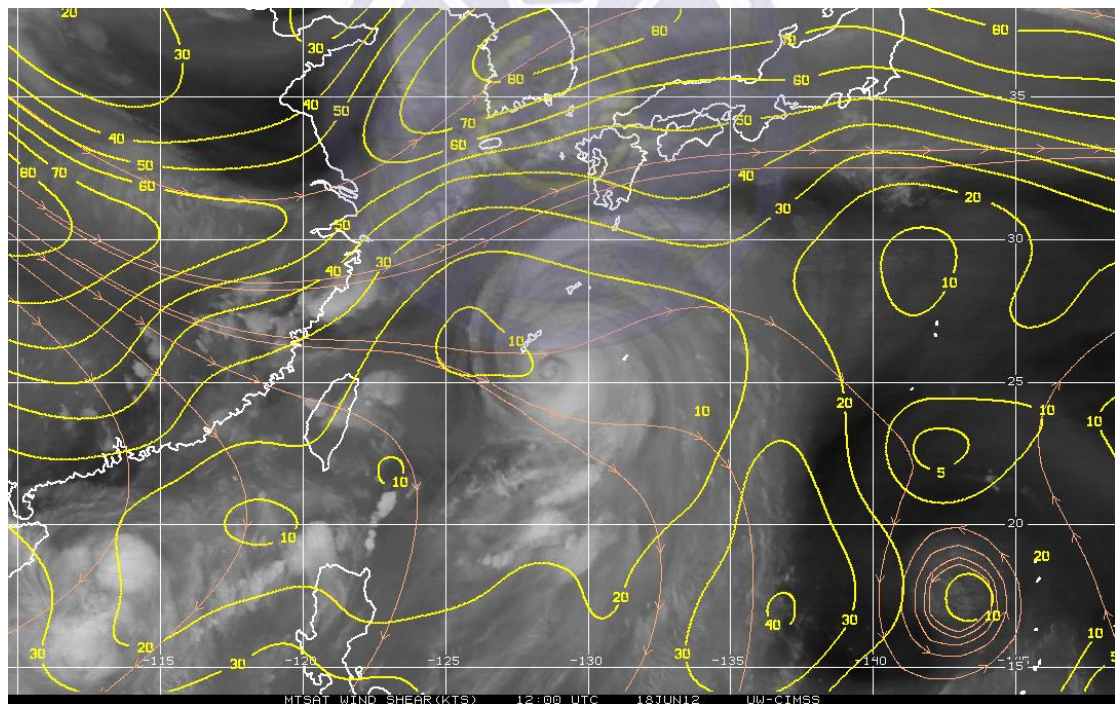


圖 8.2，為 CMISS 2012 年 6 月 18 日 1200 UTC 之深層垂直風切(約 200 減 850 hPa)疊加水氣頻道雲圖。(橘色氣流線為風切方向，等值線為風切強度，單位為 knot。)。泰利颱風位於左下角，正中間的為谷超颱風。