

國立臺灣大學理學院大氣科學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Atmospheric Sciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

颱風侵台期間路徑發生打轉之研究

A Study on the Occurrence of Looping Track

for Typhoons Affecting Taiwan



Yu-Ching Chen

指導教授：李清勝 博士

Advisor: Cheng-Shang Lee, Ph.D.

中華民國 99 年 7 月

July, 2010

致謝

首先誠摯的感謝指導教授李清勝老師，您悉心的教導使我得以完成碩士學業，並不時的指點我正確方向，使我在這兩年中獲益匪淺。老師總是提供我們良好的研究環境與電腦資源，使得在實驗室做研究是相當快樂的事情。

本論文的完成另外亦得感謝口試委員：陳泰然、葉天降、簡芳菁以及吳俊傑老師，由於有您們的寶貴建議，使得本論文能夠更完整而嚴謹。

我從原本在氣象站上班，到申請留職停薪，感謝氣象局給我兩年的進修時間。兩年的日子過得很快，實驗室裡共同的生活點滴，學術上的討論和趕論文的革命情感等等都是我日後的美好回憶。感謝嫵竹學姐細心的幫我找出論文上需要修改的地方與程式上的幫忙，偉庭、奕霖、柏孚、魚丸、雍嵐和昆緯提供許多寶貴的建議，一起趕論文的楚嫻和實驗室的麗蓉學姐、倍甄、可愛的小威、光浩、小智、旭峰和竹君，有你/妳們的陪伴讓兩年的研究生活變得絢麗多彩。感謝認識多年的張咪與小紅帽，常常在我無聊時陪我聊天，還有借我精美筆記的憶婷學姐，很感謝你們。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親、姐姐和妹妹，有你們在背後默默的支持，是我最大的動力與信心來源。

摘要

本研究使用中央氣象局歷史颱風資料，分析侵台時具打轉路徑的颱風之特徵，並使用 WRF 模擬侵台期間發生打轉的辛樂克颱風（2008），探討導致打轉現象的可能原因。分析時為幫助了解打轉颱風的重要特徵，亦針對和打轉個案具相似路徑但並未打轉的颱風進行分析。結果顯示，西北行侵襲北台灣之颱風，若其生命期中曾發展至強烈颱風且移動速度較慢時，侵台期間發生打轉路徑的可能性較高。當颱風登陸台灣的緯度較高時，打轉的位置傾向先貼著地形邊界往南偏移；但若在較低緯度登陸時，開始打轉的位置約在 23.6°N 離地形 0.4° 經度。另一方面，曾發展至強烈颱風的打轉個案在打轉前，台灣東南部測站大都會觀測到強焚風；而侵台期間未打轉的相似路徑颱風於登陸前，東南部各測站之焚風發生頻率及強度均遠小於打轉個案。

控制組模擬（CTRL）結果顯示，當颱風剛登陸時，近中心強風速區由東北側移到西北側，之後颱風逐漸往西南方偏移。低層渦度收支分析顯示，打轉期間輻散項和剩餘項對於提供渦度變率的正貢獻多於渦度平流項。分析 CTRL（最大風速半徑為 70 km）和對照組實驗結果顯示，TR-60（最大風速半徑為 60 km，未打轉）之颱風登陸前，台灣東南部海面上達 36°C 的暖空氣區域，其範圍較 TR-80（最大風速半徑為 80 km，打轉）或 CTRL 者為小，顯示颱風侵台期間台灣東南部海域的乾熱區似與颱風小範圍打轉現象有所關聯。

關鍵詞：颱風、打轉、焚風、WRF、渦度收支

Abstract

Purpose of this study is to examine the occurrence of looping track for typhoons affecting Taiwan such as Supertyphoon Sinlaku (2008). All typhoons which invaded northern Taiwan in 1990~2009 and experienced looping tracks are examined. In addition, all typhoons with similar tracks but did not have looping tracks are also examined. Results show that a typhoon which moves northwestward to affect northern Taiwan tends to have higher possibility to take a looping track if its intensity is stronger and the moving speed is slower. The position of the looping path also is related to TYs' landfall position. On the other hand, significant foehn phenomenon often occurs near southeastern Taiwan before the looping track of typhoon.

High resolution (4 km) simulation is conducted using WRF (Weather Research and Forecasting Model) V3.1.1 to investigate the possible mechanisms leading to the looping motion of Supertyphoon Sinlaku which affected Taiwan in 2008. In the control experiment, the typhoon intensity, structure and track especially the landfall point and the looping track are well-simulated. When Sinlaku just making landfall, its stronger wind field shift from northeast to northwest. Such change in wind field structure tended to drift typhoon toward the southwest. A detail vorticity budget analysis ($\eta = 0.88 \sim 0.993$) reveals that the divergence term and residual term were enhanced significantly. They are the major contribution to the local change of relative vorticity and cause typhoon to change its moving direction from northwestward to southwestward. At low level ($\eta = 0.993$), a large area of warm and dry air which is caused by the adiabatic warming of the downslope flow associated with Sinlaku after crossing over the mountains is observed at the southeast of Taiwan.

Key words : Typhoons, Looping tracks, Foehn, WRF, Vorticity budget.

目錄

摘要.....	I
Abstract	II
目錄.....	III
圖目錄.....	IV
表目錄.....	XI
第一章 前言.....	1
1-1 文獻回顧.....	1
1-2 研究動機與目的.....	5
第二章 打轉和未打轉颱風個案分析.....	7
2-1 侵台期間打轉之颱風.....	9
(1) 楊希 (1990 年 8 月)	9
(2) 寶莉 (1992 年 8 月)	10
(3) 海棠 (2005 年 7 月)	10
(4) 泰利 (2005 年 8 月)	11
(5) 柯羅莎 (2007 年 10 月)	12
(6) 辛樂克 (2008 年 9 月)	13
(7) 薔蜜 (2008 年 9 月)	14
2-2 侵台期間未打轉之颱風.....	15
(1) 葛拉絲 (1994 年 8 月)	15
(2) 納坦 (2004 年 10 月)	15
(3) 碧利斯 (2006 年 7 月)	16
(4) 卡玫基 (2008 年 7 月)	17
2-3 選取個案之綜合分析.....	17
第三章 辛樂克颱風侵台期間之模擬與校驗.....	21
3-1 數值模式介紹.....	22
3-2 模式設定.....	23
3-3 資料來源及渦旋植入.....	23
3-4 控制組模擬結果校驗.....	25
第四章 辛樂克颱風登陸後打轉之物理機制探討.....	28
4-1 環境場熱力效應對颱風打轉的影響.....	28
4-2 打轉期間風場演變.....	30
4-3 打轉期間渦度收支變化.....	32
4-4 颱風路徑未打轉之對照組模擬實驗.....	33
第五章 討論與總結.....	38
參考文獻.....	41
附錄 A.....	45
附錄 B.....	54
附表.....	55
附圖.....	59

圖目錄

- 圖 1-1 1960~1972 年間，22 個西行侵台颱風於登陸前 48 hr 至出海後 12 hr 路徑圖。(Brand and Brelloch, 1974) 59
- 圖 1-2 風暴侵台路徑圖(實線為實驗組，乃考慮台灣地形存在時的情況；虛線為僅考慮海洋表面時之控制組)(a)背景東風流場 5 ms^{-1} (每 4 hr 定位環流中心)、(b)背景東風流場 10 ms^{-1} (每 2 hr 定位環流中心)。(Bender et al., 1987) 59
- 圖 1-3 西行移動接近理想台灣地形的熱帶氣旋路徑圖，強(弱)渦旋 P_{\min} 為 985 hPa (1001 hPa)、 V_{\max} 為 33 ms^{-1} (19 ms^{-1}) 和 R_{\max} 皆為 135 km (後兩項為在 900 hPa 的情況)(a)強渦旋於背景東風流場 2.5 ms^{-1} 、(b)強渦旋於背景東風流場 5 ms^{-1} 、(c)弱渦旋於背景東風流場 2.5 ms^{-1} 、(d)弱渦旋於背景東風流場 5 ms^{-1} 、(e)弱渦旋於背景東風流場 10 ms^{-1} 。(Yeh and Elsberry, 1993a) 60
- 圖 1-4 觀測和模擬颱風路徑圖(a)碧利斯(2000)、(b)桃芝(2001)。颱風標識為觀測颱風每 6 hr 定位，星形、正方形、圓形和三角形標識依序為表面、700、500 and 300 hPa 層之模擬颱風每 3 hr 定位。(Lin et al., 2006) 60
- 圖 1-5 模擬海棠(2005)颱風於台灣東部近海逐時中心(颱風標識)與擾動場渦旋中心(藍色圓點)之位置。(葉等, 2005) 61
- 圖 1-6 模式積分 33 hr 海棠(2005)颱風 700 hPa 非對稱風場，粗箭頭為颱風移動方向，細箭頭為不同氣壓層之非對稱水平風向量。(full wind barb 代表 5 ms^{-1}) (Jian and Wu, 2008) 61
- 圖 1-7 空氣塊軌跡(a)乾流場中， $u=10 \text{ ms}^{-1}$ 、(b)考慮水氣時， $u=10 \text{ ms}^{-1}$ 、(c)考慮水氣時， $u=5 \text{ ms}^{-1}$ 、(d)考慮水氣時， $u=20 \text{ ms}^{-1}$ 。(洪與胡, 1989) 62
- 圖 1-8 1961~2007 年颱風季期間 54 個增溫事件的颱風路徑圖，其中紅色線為海棠(2005)颱風之路徑，圓點代表焚風發生時的颱風中心位置(a)西北部測站發生焚風之 23 個颱風路徑、(b)東南部測站發生焚風之 31 個颱風路徑。(Chen et al., 2010) 62
- 圖 1-9 歷史上颱風侵台期間發生打轉的個案(a)雪莉(Shirley, 1960)、(b)瑪麗(Mary, 1965)、(c)艾爾西(Elsie, 1969)、(d)莎拉(Sarah, 1989)、(e)楊希(Yancy, 1990)、(f)寶莉(Polly, 1992)、(g)海棠(Haitang, 2005)、(h)泰利(Talim, 2005)、(i)柯羅莎(Krosa, 2007)、(j)辛樂克(Sinlaku, 2008)、(k)薔蜜(Jangmi, 2008)。(CWB 歷史颱風資料庫) 63
- 圖 2-1 1990~2009 年西北行侵台颱風(a)侵台期間打轉的 7 個颱風(薔蜜, 2008; 辛樂克, 2008; 柯羅莎, 2007; 泰利, 2005; 海棠, 2005; 寶莉, 1992;

	楊希，1990)、(b) 侵台期間未打轉的 4 個颱風 (卡玫基，2008；碧利斯，2006；納坦，2004；葛拉絲，1994)、(c) 全部個案生命期路徑圖。(楊希、寶莉和葛拉絲使用王時鼎之再分析路徑資料，其餘個案使用 CWB 颱風警報單上定位)	64
圖 2-2	CWB 局屬測站位置圖，紅圓點由北到南依序是 466990 花蓮測站 (23°58'37"N、121°36'18"E，高度 16.0 m)；467610 成功測站 (23°05'57"N、121°21'55"E，高度 33.5 m)；467660 臺東測站 (22°45'15"N、121°08'48"E，高度 9.0 m)；467540 大武測站 (22°21'27"N、120°53'44"E，高度 8.1m)。	65
圖 2-3	颱風侵台期間 (登陸前 24 hr~登陸後 12 hr) 花蓮、成功、台東和大武測站於焚風發生時之最低相對濕度 (RH_{min} ，單位為%) 分布圖。.....	65
圖 2-4	楊希颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 8 月 (a) 18 日 0000 UTC、(b) 19 日 0000 UTC、(c) 19 日 1200 UTC，紅色虛線為中緯度槽線，箭頭為副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西側或為其減弱一分為二的位置。(資料來源：CWB)	66
圖 2-5	楊希颱風登陸前 24 hr~登陸後 12 hr (8 月 18 日 0300 UTC~19 日 1500 UTC) 東南部測站地面觀測資料時間序列，橫軸為相對登陸之小時數 (h)，綠線、紅線、橘線和藍直條依序為氣溫 ($^{\circ}C$)、相對濕度 (%)、測站氣壓 (hPa) 和時雨量 (mm)，灰色、粉紅色和橘色區域依序為夜間 (1000~2200 UTC)、颱風打轉期間和焚風發生期間 (a) 花蓮測站、(b) 成功測站、(c) 台東測站、(d) 大武測站。(資料來源：CWB)	67
圖 2-6	11 個颱風侵台期間 (登陸前 24 hr~登陸後 12 hr) 之中心最低氣壓 (P_{min}) 和平均最大風速 (V_{max}) 圖，橫軸為相對登陸之小時數 (a) P_{min} 、(b) V_{max} 。(資料來源：CWB)	68
圖 2-7	寶莉颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 8 月 (a) 29 日 1200 UTC、(b) 30 日 1200 UTC，紅色虛線、實線和箭頭依序為中緯度槽線、太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線和副熱帶高壓減弱一分為二的位置。(資料來源：CWB)	69
圖 2-8	同圖 2-5，但為寶莉颱風 (8 月 29 日 0600 UTC~30 日 1800 UTC)。...	69
圖 2-9	海棠颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 7 月 (a) 17 日 1200 UTC、(b) 18 日 0000 UTC，紅色虛線、實線和箭頭依序為中緯度槽線、太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線和 5880 gpm 等值線西側的位置。(資料來源：CWB)	70
圖 2-11	同圖 2-9，但為泰利颱風，時間為 8 月 (a) 30 日 0000 UTC、(b) 31 日 0000 UTC、(c) 31 日 1200 UTC、(d) 9 月 1 日 0000 UTC。.....	71
圖 2-12	同圖 2-5，但為泰利颱風 (8 月 31 日 0000 UTC~9 月 1 日 1200 UTC)。	72
圖 2-13	同圖 2-9，但為柯羅莎颱風，時間為 10 月 (a) 4 日 1200 UTC、(b) 5 日	

	0000 UTC、(c) 5 日 1200 UTC、(d) 6 日 0000 UTC、(e) 6 日 1200 UTC。	73
圖 2-14	同圖 2-5，但為柯羅莎颱風 (10 月 5 日 1500 UTC~7 日 0300 UTC)。	74
圖 2-15	辛樂克颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 9 月 (a) 12 日 0000 UTC、(b) 13 日 0000 UTC、(c) 14 日 0000 UTC，紅色虛線和箭頭分別為中緯度槽線和副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西側的位置。(資料來源：CWB)	75
圖 2-16	同圖 2-5，但為辛樂克颱風 (9 月 12 日 1800 UTC~14 日 0600 UTC)。	76
圖 2-17	同圖 2-9，但為蕃蜜颱風，時間為 9 月 (a) 27 日 0000 UTC、(b) 28 日 0000 UTC、(c) 28 日 1200 UTC、(d) 29 日 0000 UTC。	77
圖 2-18	同圖 2-5，但為蕃蜜颱風 (9 月 27 日 0800 UTC~28 日 2000 UTC)。	78
圖 2-19	葛拉絲颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 8 月 (a) 30 日 1200 UTC、(b) 31 日 0000 UTC、(c) 31 日 1200 UTC、(d) 9 月 1 日 0000 UTC。(資料來源：CWB)	79
圖 2-20	同圖 2-5，但為葛拉絲颱風 (8 月 31 日 0300 UTC~9 月 1 日 1500 UTC)。	80
圖 2-21	納坦颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 10 月 (a) 24 日 0000 UTC、(b) 24 日 0000 UTC (700 hPa)、(c) 24 日 1200 UTC (700 hPa)、(d) 25 日 1200 UTC (700 hPa)。(資料來源：CWB)	81
圖 2-22	同圖 2-5，但為納坦颱風 (10 月 24 日 0300 UTC~25 日 1500 UTC)。	82
圖 2-23	碧利斯颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 7 月 (a) 12 日 0000 UTC、(b) 13 日 0000 UTC、(c) 13 日 1200 UTC、(d) 14 日 0000 UTC，紅色虛線和實線分別為中緯度槽線和太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線。(資料來源：CWB)	83
圖 2-24	同圖 2-5，但為碧利斯颱風 (7 月 12 日 1500 UTC~14 日 0300 UTC)。	84
圖 2-25	同圖 2-9，但為卡孜基颱風，時間為 7 月 (a) 16 日 0000 UTC、(b) 17 日 0000 UTC、(c) 18 日 0000 UTC。	85
圖 2-26	同圖 2-5，但為卡孜基颱風 (7 月 16 日 1400 UTC~18 日 0200 UTC)。	86
圖 2-27	打轉 (a) 與未打轉 (b) 颱風登陸前 24 hr~登陸後 12 hr 的逐時移速圖，橫軸為相對登陸 (灰虛線) 之小時數 (h)，縱軸為移速 (km h^{-1})，圓點表颱風正發生打轉，颱風名字下之數字代表打轉 (未打轉) 颱風打轉前 (登陸前) 之平均移速。(資料來源：CWB)	87
圖 3-1	辛樂克颱風路徑圖，時間：9 月 8 日 0000 UTC~18 日 0000 UTC。(資料來源：CWB 每 6 hr 定位資料，其中 12 日 0000 UTC~15 日 0000 UTC 為逐時定位)	88
圖 3-2	辛樂克颱風強度變化圖，包含中心最低氣壓 (P_{\min} , hPa) 和平均最大風速 (V_{\max} , ms^{-1})，紅色箭頭處代表颱風登陸時間 (13 日 1750 UTC)。(資料來源：JTWC、JMA 和 CWB 每 6 hr 定位資料)	89

圖 3-3	WRF-ARW 流程圖。	89
圖 3-4	Arakawa C Grid 的示意圖， u 和 v 為速度變數， m 為熱力變數。	90
圖 3-5	ARW 垂直質量座標系統，摘自 Skamarock et al. (2005)。	90
圖 3-6	三層巢狀網格配置圖（網格間距依序為 36、12 和 4 km）。	90
圖 3-7	控制組實驗 (CTRL) 最內層網巢所解析的台灣地形圖（解析度為 4 km）。	90
圖 3-8	模擬初始場（時間：9 月 12 日 0000 UTC，颱風中心位置 22.7°N 、 124.3°E ）第三層巢狀網格之風場 (ms^{-1}) 分布圖（等值線間距為 5ms^{-1} ），左圖為渦旋植入前，右圖為植入渦旋後 (a) 500 hPa 切向風場、(b) 同 (a)、(c) 850 hPa 切向風場、(d) 同 (c)、(e) 22.7°N 切向風場垂直剖面、(f) 同 (e)。	91
圖 3-9	模擬初始場（時間：9 月 12 日 0000 UTC，颱風中心位置 22.7°N 、 124.3°E ）第三層巢狀網格渦旋植入前後之 22.7°N 、 $120^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$ 的 850 hPa 風場 (ms^{-1}) 水平剖面圖 (a) 植入渦旋前、(b) 植入渦旋後。	92
圖 3-10	分析 (左) 和模擬 (右) 之地面天氣圖，等值線間距為 4 hPa，左圖紅色虛線圍繞區域對應於右圖之網域範圍，紅色箭頭為副熱帶高壓西側 1012 hPa 等值線的位置，時間為 (a) 9 月 13 日 0000 UTC、(b) 同 (a)、(c) 9 月 14 日 0000 UTC、(d) 同 (c)。	92
圖 3-11	辛樂克颱風 CWB 逐時定位資料 (粉紅色) 與模式控制組 (a) 850 hPa 逐時環流中心路徑 (藍色)、(b) $\eta=0.88\sim 0.993$ ，約 880~990 hPa 之逐時平均渦度中心路徑 (橘色)。(時間：9 月 12 日 0600 UTC~15 日 0000 UTC)	93
圖 3-12	辛樂克颱風模擬之 850 hPa 環流中心位置誤差（相對於 CWB 颱風中心定位），單位為 km，橫軸 91206 表 9 月 12 日 0600 UTC；模擬（觀測）之打轉時間為 13 日 2000 UTC~14 日 0000 UTC (13 日 1800 UTC~14 日 0000 UTC)。	94
圖 3-13	辛樂克颱風模擬 850 hPa 環流中心 (藍色) 與 CWB 路徑資料之移速 (粉紅色)，單位為 ms^{-1} ，圖中橫軸 91212 所對應之縱軸數值代表 9 月 12 日 0600~1200 UTC 之移速；模擬（觀測）之打轉時間為 13 日 2000 UTC~14 日 0000 UTC (13 日 1800 UTC~14 日 0000 UTC)。	94
圖 3-14	辛樂克颱風控制組模擬結果 (藍色)、日本氣象廳 (橘色)、美國 JTWC Best Track (黃色) 和 CWB (粉紅色) 之中心最低氣壓 (hPa)，橫軸 91206 表 9 月 12 日 0600 UTC。	94
圖 3-15	雷達回波圖 (dBZ) 模擬結果校驗，左圖為 CWB 合成雷達-CV 圖，右圖為與之對應的模擬雷達回波，模擬時間比觀測晚 2 hr (a) 13 日 0600 UTC、(b) 13 日 0800 UTC、(c) 13 日 1200 UTC、(d) 13 日 1400 UTC、(e) 13 日 1700 UTC、(f) 13 日 1900 UTC、(g) 13 日 1800 UTC、(h) 13 日 2000 UTC、(i) 13 日 2000 UTC、(j) 13 日 2200 UTC、(k) 13 日 2200 UTC、	

	(1) 14 日 0000 UTC、(m) 14 日 0000 UTC、(n) 14 日 0200 UTC。... 95
圖 3-16	辛樂克颱風累積雨量圖 (mm) 模擬結果校驗，左圖為 CWB 觀測資料，右圖為對應時間模式模擬結果(a)登陸前 41 hr(09120000~09131700 UTC)、(b)同(a)、(c)中心登陸期間 4 hr (09131700~09132100 UTC)、(d)同(c)、(e)出海後 27 hr (09132100~09150000 UTC)、(f)同(e)、(g)侵台期間 (09120000~09150000 UTC) 總雨量、(h)同(g)。..... 97
圖 4-1	控制組模擬之不同高度層逐時環流中心路徑圖，藍色、粉紅色和灰色線條依序為 850、700 和 500 hPa 層；圖中數字代表時間，如：1318 代表 13 日 1800 UTC；經緯度範圍：121.7~122.1°N、24.25~24.5°E。..... 98
圖 4-2	控制組模擬之海平面氣壓場 (等值線間距為 1 hPa)，綠色線條和圓點 (●) 分別為模擬颱風 850 hPa 環流中心之路徑與位置，時間為 13 日 (a) 1800 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC、(d) 2100 UTC、(e) 2200 UTC、(f) 2300 UTC。..... 99
圖 4-3	控制組模擬之近地層 ($\eta = 0.993$ ，約 990 hPa) 水平風場向量 (ms^{-1} ，箭頭)、溫度 (等值線，間距為 2 °C) 和相對溼度 (陰影)，綠色線條、圓點 (●)、紅和紫虛線依序為模擬颱風 850 hPa 環流中心之路徑、位置、溫度達 30 和 36 °C 範圍，時間為 13 日 (a) 1800 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC、(d) 2100 UTC、(e) 2200 UTC、(f) 2300 UTC。..... 100
圖 4-4	同圖 4-3，但為 $\eta = 0.8362$ (約 850 hPa)。..... 101
圖 4-5	控制組模擬之低層 ($\eta = 0.88 \sim 0.993$ ，約 880~990 hPa) 平均水平風速 (ms^{-1} ，陰影) 和風場向量 (箭頭)，綠色線條和圓點 (●) 分別為模擬颱風 850 hPa 環流中心之路徑和位置，時間為 13 日 (a) 1300 UTC、(b) 1500 UTC、(c) 1700 UTC、(d) 1900 UTC、(e) 2000 UTC、(f) 2100 UTC、(g) 2200 UTC、(h) 2300 UTC、(i) 14 日 0000 UTC。..... 102
圖 4-6	同圖 4-5，但為 $\eta = 0.6277 \sim 0.8362$ (約 640~820 hPa)。..... 103
圖 4-7	控制組模擬之低層 ($\eta = 0.88 \sim 0.993$ ，約 880~990 hPa) 平均水平輻散場 (紅色為正值；藍色為負值；黃色為 0；等值線間距為 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)，藍色線條和綠色圓點 (●) 分別為模擬颱風 850 hPa 環流中心之路徑與位置，時間為 13 日 (a) 1900 UTC、(b) 2000 UTC、(c) 2100 UTC、(d) 2200 UTC。..... 104
圖 4-8	模擬積分 43 hr (13 日 1900 UTC) 之低層 ($\eta = 0.88 \sim 0.993$ ，約 880~990 hPa) 平均渦度收支，紅和藍色各表正和負值，黃色為 0，a 等值線間距為 $5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ，b~f 為 $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ ，綠色線條和圓點 (●) 分別為模擬颱風之逐時平均渦度中心路徑與位置 (a) 局部渦度變化、(b) 水平平流項、(c) 垂直平流項、(d) 輻散項、(e) 扭轉項、(f) 剩餘項。..... 105
圖 4-9	同圖 4-8，但為積分 44 hr (13 日 2000 UTC)。..... 106
圖 4-10	同圖 4-8，但為積分 45 hr (13 日 2100 UTC)。..... 107
圖 4-11	同圖 4-8，但為積分 46 hr (13 日 2200 UTC)。..... 108

圖 4-12	控制組模擬之 850 hPa 環流中心逐時路徑(藍色、咖啡和紅色依序為 CTRL、TR-60 和 TR-80 實驗)與 CWB 逐時定位資料(粉紅色)。(時間：9 月 12 日 0600 UTC~15 日 0000 UTC)	109
圖 4-13	辛樂克颱風中心最低氣壓時間序列，橘和黃色分別為 JMA 和美國 JTWC Best Track 之資料；藍、咖啡和紅色依序為 CTRL 實驗、TR-60 和 TR-80 之模式模擬結果。	109
圖 4-14	同圖 4-3，但為實驗 TR-60，時間為 13 日 (a) 2100 UTC、(b) 2200 UTC、(c) 2300 UTC、(d) 14 日 0000 UTC、(e) 14 日 0100 UTC、(f) 14 日 0200 UTC。	110
圖 4-15	同圖 4-3，但為實驗 TR-80，時間為 13 日 (a) 1800 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC、(d) 2100 UTC、(e) 2200 UTC、(f) 2300 UTC。	111
圖 4-16	同圖 4-5，但為實驗 TR-60，時間為 13 日 (a) 1600 UTC、(b) 1800 UTC、(c) 2000 UTC、(d) 2100 UTC、(e) 2200 UTC、(f) 2300 UTC、(g) 14 日 0000 UTC、(h) 14 日 0100 UTC、(i) 14 日 0200 UTC。	112
圖 4-17	同圖 4-7，但為實驗 TR-60，時間為 13 日 (a) 2100 UTC、(b) 2200 UTC、(c) 2300 UTC、(d) 14 日 0000 UTC。	113
圖 4-18	同圖 4-8，但為實驗 TR-60 積分 47 hr (13 日 2300 UTC)。	114
圖 4-19	同圖 4-8，但為實驗 TR-60 積分 48 hr (14 日 0000 UTC)。	115
圖 4-20	同圖 4-8，但為實驗 TR-60 積分 49 hr (14 日 0100 UTC)。	116

【附錄圖】

圖 A1	楊希颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 30 hr (08172000~08190200 UTC)、(b) 中心登陸期間 14 hr (08190200~08191600 UTC)、(c) 出海後 29 hr (08191600~08202100 UTC)、(d) 侵台期間(08172000~08202100 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	117
圖 A2	寶莉颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 71 hr (08270700~08300600 UTC)、(b) 中心登陸期間 6 hr(08300600~08301200 UTC)、(c) 出海後 38 hr(08301200~09010200 UTC)、(d) 侵台期間 (08270700~09010200 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	118
圖 A3	海棠颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 39 hr (07161500~07180600 UTC)、(b) 中心登陸期間 8 hr(07180600~07181400 UTC)、(c) 出海後 53 hr(07181400~07201900 UTC)、(d) 侵台期間 (07161500~07201900 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	119
圖 A4	泰利颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 35 hr (08301200~08312300 UTC)、(b) 中心登陸期間 1 hr(08312300~09010000 UTC)、(c) 出海後 41 hr(08312300~09021600 UTC)、(d) 侵台期間 (08301200~09021600 UTC) 總雨量。	

	(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	120
圖 A5	柯羅莎颱風累積雨量圖(a)登陸前 35 hr(10042100~10061400 UTC)、(b)中心登陸期間 2 hr(10061400~10061600 UTC)、(c)出海後 45 hr(10061600~10081300 UTC)、(d)侵台期間(10042100~10081300 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	121
圖 A6	辛樂克颱風累積雨量圖(a)登陸前 44 hr(09112100~09131700 UTC)、(b)中心登陸期間 4 hr(09131700~09132100 UTC)、(c)出海後 64 hr(09132100~09161300 UTC)、(d)侵台期間(09112100~09161300 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	122
圖 A7	薔蜜颱風累積雨量圖(a)登陸前 31 hr(09270000~09280700 UTC)、(b)中心登陸期間 14 hr(09280700~09282100 UTC)、(c)出海後 37 hr(09282100~09301000 UTC)、(d)侵台期間(09270000~09301000 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	123
圖 A8	葛拉絲颱風累積雨量圖(a)登陸前 24 hr(08310200~09010200 UTC)、(b)中心登陸期間 5 hr(09010200~09010700 UTC)、(c)出海後 36 hr(09010700~09021900 UTC)、(d)侵台期間(08310200~09021900 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	124
圖 A9	納坦颱風累積雨量圖(a)登陸前 29 hr(10232100~10250200 UTC)、(b)中心登陸期間 4 hr(10250200~10250600 UTC)、(c)出海後 34 hr(10250600~10261600 UTC)、(d)侵台期間(10232100~10261600 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	125
圖 A10	碧利斯颱風累積雨量圖(a)登陸前 38 hr(07120000~07131400 UTC)、(b)中心登陸期間 4 hr(07131400~07131800 UTC)、(c)出海後 49 hr(07131800~07151900 UTC)、(d)侵台期間(07120000~07151900 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	126
圖 A11	卡玫基颱風累積雨量圖(a)登陸前 19 hr(07161800~07171300 UTC)、(b)中心登陸期間 11 hr(07171300~07180000 UTC)、(c)出海後 37 hr(07180000~07191300 UTC)、(d)侵台期間(07161800~07191300 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)	127
圖 B1	對照組 TR-60 模擬雷達回波圖(dBZ)(a)13日2100 UTC、(b)13日2200 UTC、(c)13日2300 UTC、(d)14日0000 UTC、(e)14日0100 UTC、(f)14日0200 UTC。.....	128
圖 B2	對照組 TR-80 模擬雷達回波圖(dBZ)(a)13日1800 UTC、(b)13日1900 UTC、(c)13日2000 UTC、(d)13日2100 UTC、(e)13日2200 UTC、(f)13日2300 UTC。.....	129

表目錄

表 2-1	西北行走向侵台颱風簡要資訊，陰影表打轉颱風。(資料來源：CWB)	55
表 2-2	焚風等級分類。(資料來源：CWB)	56
表 2-3	颱風侵台期間之綜觀場特徵，陰影表打轉颱風。	56
表 2-4	颱風侵台期間東南部測站發生焚風時之觀測資料整理，陰影表打轉颱風。	57



第一章 前言

台灣地區山高平原少，雖然面積僅 36,188 km²（東西最寬約 166 km，南北長約 389 km），但卻擁有相當陡峭的地形，像是呈北北東至南南西走向的中央山脈（Central Mountain Range, CMR），其玉山主峰更高達 3,997 m。CMR 的存在使侵台颱風之路徑及伴隨環流產生多樣變化，甚或導致颱風路徑的突然轉向、滯留或打轉，增加預報的挑戰。2008 年 9 月 13~15 日影響台灣的辛樂克颱風，當其移至台灣東部近海時呈現滯留，且登陸後立即向南打轉一圈，除增加預報的困難度外，並使颱風環流影響台灣的時間加長，加重災情。根據內政部消防署及行政院農委會資料統計，南投地區災情慘重，如：后豐斷橋、豐丘山崩及廬山溫泉區飯店倒塌...等；總計有 14 人死亡，7 人失蹤，農損約 9 億元。辛樂克颱風個案突顯打轉颱風對台灣地區之影響程度，因此若能了解侵台時具打轉路徑的颱風特徵和導致打轉現象之物理機制，對於防範颱風災害將有所幫助。

1-1 文獻回顧

在無背景流場下，渦旋受到行星渦度梯度與非線性交互作用影響，將往西北方移動（Adem, 1956；McWilliams and Flierl, 1979；Chan and Williams, 1987）。颱風移動方向主要受到大尺度駛流場主宰，其次是地球旋轉和曲率效應（Holland, 1983；DeMaria, 1985）。當颱風侵襲台灣時，其路徑明顯受到CMR地形的影響（黃與許, 1998；Brand and Blelloch, 1974；Chang, 1982；Bender et al., 1987；Yeh and Elsberry, 1993a；Wu and Kuo, 1999；Lin et al., 1999、2005、2006；Wu, 2001；Jian and Wu, 2008）。

台灣地形影響颱風路徑偏移的研究相當豐富，觀測統計研究方面，Brand and Blelloch（1974）討論1960~1972年間，22個西行侵台颱風（圖1-1），研究顯示颱

風在接近台灣時會有往北的偏向，離開台灣時會有往南的偏向。王（1980）分析1946~1975年間，53個接近台灣的颱風，歸納顯示有些颱風會以氣旋式路徑通過台灣。

理想數值模擬方面，Bender et al.（1987）使用Geophysical Fluid Dynamics Laboratory（GFDL）颶風模式，比較背景東風流場分別為 5 ms^{-1} 和 10 ms^{-1} 時，風暴通過台灣地形的路徑偏向（圖1-2）。研究顯示背景流場為 5 ms^{-1} 之風暴的移動速度較慢，且登陸前產生較顯著的往北偏移，代表其路徑受到地形的影響較大（圖1-2a）。Yeh and Elsberry（1993a）使用解析度45 km之原始方程模式，討論西行移動接近理想地形（南北長410 km、東西寬320 km和高度2500 m）的熱帶氣旋路徑變化（圖1-3），顯示較弱和移速較慢的渦旋（圖1-3c）所受到地形之影響較明顯，導致其路徑偏移較顯著。黃和許（1998）使用Huang（1993）的中央大學中尺度數值模式（Central University Mesoscale Model, CUMM）模擬理想颱風渦旋通過真實的台灣地形，結果指出颱風路徑變化會因渦旋大小、移動速度和登陸地點不同而異。動量收支顯示，颱風受地形阻擋移速減慢，但登陸前會加速移動，原因可能是擾動氣壓梯度力和平流的作用，但此篇討論動量收支分析並無法確定造成山前渦旋路徑偏轉的機制；渦度收支指出，平流、輻合輻散作用及水平、垂直擴散項的作用都是導致渦度變化的重要參數。

Lin et al.（1999）使用三維的靜力原始方程模式（不考慮水氣）模擬西行接近台灣地形的渦旋，結果顯示當Fr數（Froude number）增大，有較多氣流爬山後快速下沉，絕熱增溫效應和台灣背風側副中心的產生有關；另外，透過上游流場阻塞和繞山的渦度平流，使得背風側產生新的位渦，導致渦度突然增加，這也是副中心形成的關鍵因素。Kuo et al.（2001）使用淺水模式，討論在無背景流場下（考慮f平面或球面）渦旋經過地形時的情況。結果顯示，當渦旋尺度小於地形尺度時，渦旋容易侷限在地形周圍且有順鐘向繞地形的路徑。在f平面實驗中，當渦旋強度

(V_{\max}) 或是地形高度 (H_{\max}) 愈大，繞行速度增加；改變 H_{\max} 和渦旋最大風速半徑 (R_{\max}) 對影響路徑形態較敏感，但後者與繞行速度較無關。在球面實驗中，當地形緯度愈高、東西方向地形尺度愈寬、 H_{\max} 較高或是 R_{\max} 較小時，渦旋繞地形順鐘向的情形愈明顯，此現象會導致在地形東側有一向南的分量，若加上駛流作用應可使颱風在地形東側產生偏向。Lin et al. (2005) 使用不考慮潛熱釋放和地表摩擦的中尺度數值模式進行一系列理想模擬實驗，並提出六個無因次控制參數： V_{\max}/Nh , U/Nh , R_{\max}/L_y , U/fL_x , V_{\max}/fR_{\max} , and h/L_x 。結果顯示當 h/L_x 較大且其餘五個參數較小時，渦旋受到地形影響會有明顯的北偏運動；其中若是 R_{\max}/L_y 較小，渦旋則會南偏，文中推測此與通道效應 (Channeling effect) 有關。

雖然理想實驗能解釋颱風路徑受到地形影響時的偏轉方向，但實際大氣下的颱風與地形特徵遠比理想數值模擬複雜；因此 Lin et al. (2006) 使用 MM5 (The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model) 模擬真實個案 (碧利斯, 2000 和桃芝, 2001) 通過近似台灣地形。結果顯示，較強和移速較快的颱風 (碧利斯) 傾向以連續路徑的方式通過台灣地形；而較弱且移速較慢的颱風 (桃芝)，則以不連續過山的路徑通過台灣 (圖1-4)。

過去對於颱風侵襲台灣期間路徑偏向的研究雖然相當豐富，但針對路徑打轉的研究卻相對較少。葉等 (2005) 使用中央氣象局 (Central Weather Bureau, CWB) 非靜力區域預報模式 (Nonhydrostatic Forecast System, NFS)，模擬海棠 (2005) 颱風登陸前的打轉現象，結果顯示受地形影響，於台灣西南部產生似渦旋擾動 (風速約 5 ms^{-1})，並和颱風發生雙渦旋互繞 (圖1-5)，此可能為海棠颱風在台灣附近打轉的原因。葉等 (2007) 進一步指出當颱風強度和暴風半徑較大時，更有利於山後似渦旋擾動的發展，而是否會有打轉現象則和颱風侵台位置、綜觀環境、颱風大小和強度等皆有關。Jian and Wu (2008) 使用 WRF (Weather Research and Forecasting Model) V2.0.3 模式，首次針對颱風與地形交互作用後，所引起之通道

效應提出較完整的動力分析，並解釋海棠（2005）颱風登陸前打轉的物理機制。結果顯示當颱風環流接近台灣時，兩者間產生北風噴流，此情況類似通道效應，並會改變颱風近中心的非對稱風場（asymmetric wind），同時500 hPa層以下之非對稱風場和颱風運動方向相當一致(圖1-6)，顯示非對稱風場變化可解釋颱風的移向。Huang et al.(2010)對柯羅莎(2007)颱風登陸前的打轉機制研究結果與Jian and Wu (2008)相同。

台灣地形除了影響颱風之路徑，對於降雨分布的影響也非常顯著；而具相似路徑之颱風的降雨分布也會有差異。林等（1988）的研究指出，相同路徑的颱風會因強度（中心氣壓、暴風半徑、最大風速）、移動速度或季節性的綜觀天氣形態不同，降水多寡和分布也會不同。謝等（1997）分析賀伯（1996）颱風中心通過北台灣時，風場由西北風轉為西風，再轉為西南風，使含豐富水氣的颱風環流持續越過CMR，造成迎風面的大量降水及背風面相對少雨。Wu et al.（2002）使用MM5模式，針對賀伯（1996）颱風使用不同地形或網格解析度（60、20、6.7或2.2 km）進行一系列模擬實驗；結果顯示高解析中尺度模式能合理模擬賀伯颱風的降雨分布，只要有準確的路徑預報，降低水平網格間距和提高地形解析度，模擬雨量皆會增加。

西北行颱風侵台期間，東南部測站時常觀測到焚風現象（Liao，1979；Shieh et al., 1996；Chen et al., 2010）。Liao（1979）之研究顯示，颱風於台灣北部通過時，台東地區常有焚風產生，文中推測雪莉（1960）颱風登陸前發生打轉的原因，與台灣東南方形成的焚風低壓有關，但對颱風的突然轉向仍未能提出完整的動力解釋。郭和楊（1982）依據CWB 1959~1979年各測站之颱風侵台期間逐時溫度和相對濕度資料分析焚風發生機率，結果指出66個侵台颱風中有47個曾至少在某一測站誘發焚風，機率高達71%。洪和胡（1990）使用二維流體靜力平衡數值模式進行一系列理想實驗，結果顯示迎風面強風是誘發山背焚風的主因。考慮水氣時，

若風速較小 ($u=5 \text{ ms}^{-1}$)，於迎風面靠近山頂之地方有雲雨產生的潛熱使空氣變熱上升，越過山後不會下沉，所以不會導致焚風 (圖 1-7c)；當風速較大 ($u=20 \text{ ms}^{-1}$) 時，空氣擁有足夠的慣性，越過山頂後才會形成強勁的下衝流，造成焚風現象 (圖 1-7d)；當風速介於兩者之間 ($u=10 \text{ ms}^{-1}$) 時，近地層氣塊可爬過山頂再下沉，但下降幅度達不到地表。在乾流場 ($u=10 \text{ ms}^{-1}$) 中，雖然近地層氣塊無法爬過山頂，但山前 1 km 高度處的氣塊仍可以越山後往下衝 (圖 1-7a)。Wu (2001) 針對葛拉絲 (1994) 颱風進行觀測分析與模擬 (使用 GFDL 颶風模式)，探討台灣地形對颱風的影響。結果顯示當颱風環流接近及登陸台灣時，位於台灣東南部的局部低壓乃颱風環流過山時下沉氣流絕熱增溫所導致。Chen et al. (2010) 分析 1961~2007 年間颱風路徑與焚風之關係，結果顯示當西北行 (西行) 颱風通過台灣北部或東北部海面 (台灣南部或巴士海峽) 時，易在台灣東南部 (西北部) 測站觀測到焚風發生 (圖 1-8)。

綜合而言，過去關於侵台颱風的研究相當豐富，亦從分析許多觀測資料、模擬理想或真實個案，探討導致颱風路徑變化與降雨分布的物理機制，雖然不同颱風都有其獨特性，但研究結果皆顯示 CMR 在颱風路徑、結構及降雨等方面都具舉足輕重的影響。然而有關颱風侵台期間路徑發生打轉的機制，目前仍無法充分了解。

1-2 研究動機與目的

颱風侵台期間發生打轉除增加預報的困難度外，並使颱風環流影響台灣的時間加長，若能了解導致打轉現象之物理機制，對於防範颱風災害將有所幫助。過去颱風侵台期間發生打轉路徑的情況並不多見，根據 CWB 歷史颱風資料庫 (<http://photino.cwb.gov.tw/tyweb/tyfnweb/historical.htm>)，自 1958 至 2009 年間共有 257 個有發警報的颱風，但僅有 11 個颱風於侵台期間發生打轉，分別是雪莉 (Shirley，

1960)、瑪麗 (Mary, 1965)、艾爾西 (Elsie, 1969)、莎拉 (Sarah, 1989)、楊希 (Yancy, 1990)、寶莉 (Polly, 1992)、海棠 (Haitang, 2005)、泰利 (Talim, 2005)、柯羅莎 (Krosa, 2007)、辛樂克 (Sinlaku, 2008) 及薔蜜 (Jangmi, 2008) 颱風；打轉颱風之路徑如圖 1-9 所示，圖中顯示颱風大都以西北行路徑侵襲台灣。過去文獻曾分析過的打轉颱風，有雪莉 (Liao, 1979)、海棠 (Jian and Wu, 2008；葉等, 2005) 及柯羅莎 (Huang et al., 2010)。

本研究針對過去二十年 (1990~2009 年) 侵台期間發生打轉的 7 個颱風，分析其伴隨之重要特徵，並比較其和具相似路徑但並未打轉的颱風之差異，期望了解打轉颱風的重要特徵，尤其是台灣東南部測站伴隨焚風之發生頻率與強度。此外，研究中亦使用 WRF 模式，模擬辛樂克 (2008) 颱風接近台灣地形時路徑打轉之現象，並透過模擬結果，探討導致打轉過程的可能物理機制。

本文第二章為颱風個案分析，使用觀測資料討論打轉發生與否之颱風特徵，涵蓋侵台期間誘發東南部測站的焚風現象；第三章為模擬近年侵台期間發生打轉的辛樂克 (2008) 颱風，並針對模擬結果進行校驗；第四章將討論辛樂克颱風的打轉機制，嘗試找出不同於過去文獻中所提到之誘發因素；最後一章為討論與總結。

第二章 打轉和未打轉颱風個案分析

為了解侵台時具打轉路徑的颱風特徵，首先分析近年（1990~2009 年）CWB 有發警報且於侵台期間發生打轉的颱風個案，颱風路徑如圖 2-1a 所示。分析結果顯示，7 個打轉個案（薔蜜，2008；辛樂克，2008；柯羅莎，2007；泰利，2005；海棠，2005；寶莉，1992；楊希，1990）具有下列特徵：

- (1) 除楊希、辛樂克和薔蜜在登陸後打轉外，其餘皆在登陸前打轉。較特別的是辛樂克出海後在台灣北部外海亦打轉一圈，而楊希颱風打轉過程發生在台灣西北部（山脈西側）。
- (2) 除楊希和薔蜜外，其餘個案打轉現象發生的位置皆在台灣東部沿海 23.0°N 以北，此可能和 CMR 於 $23.0\sim 24.5^{\circ}\text{N}$ 地勢較高有關，且打轉時之南偏路徑幾乎貼著地形邊界。
- (3) 除楊希與寶莉分別僅發展至中度和輕度颱風外，其餘個案在生命史過程中皆發展到強烈颱風。
- (4) 打轉的颱風路徑與台灣山脈軸線之交角在 $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 之間。
- (5) 登陸前的路徑大致呈西北走向（當颱風經過 21°N 時，經度在 123°E 以東；且到達 125°E 時，緯度低於 23.6°N ）且登陸台灣的緯度介於 $24.0\sim 25.3^{\circ}\text{N}$ 之間。

為了解影響/伴隨打轉颱風之重要特徵，亦分析和打轉個案具相似路徑但並未發生打轉的颱風。為使未打轉個案能與打轉個案具極相似之路徑，依據上述特徵第 (5) 點做為選擇未打轉個案之依據，且同樣是 1990~2009 年侵台之颱風。滿足條件的有 4 個颱風個案（卡玫基，2008；碧利斯，2006；納坦，2004；葛拉絲，1994），僅約為打轉颱風個數之一半，其路徑如圖 2-1b 所示。比較圖 2-1a 和圖 2-1b 顯示，打轉與未打轉個案在行經 23.6°N 至登陸時的路徑分別呈「西北至西北西走

向」與「北北西走向」，因此西北行至台灣宜蘭或花蓮外海之颱風，侵台期間打轉與否，和接近台灣地形時之路徑走向的細微差異似有關聯。上述 11 個颱風個案之簡要資訊與生命期路徑圖如表 2-1 與圖 2-1c 所示。

過去文獻指出西北行颱風侵襲北台灣期間，東南部測站時常觀測到焚風現象 (Liao, 1979; Shieh et al., 1996; Chen et al., 2010); 由於打轉與未打轉個案皆以西北方向侵襲北台灣，故應容易在東南部測站觀測到焚風發生。關於颱風的打轉現象，前人提出「通道效應」來解釋；在本研究中，提供一個可能的思考方向，也就是分析焚風效應與打轉現象的伴隨關係。2-1 節和 2-2 節中，將簡要介紹上述 11 個颱風個案的綜觀環境場和侵台期間誘發東南部測站的焚風 (Foehn) 現象，重點在討論具相似西北行路徑之颱風，打轉 (7 個) 與未打轉 (4 個) 颱風在觀測資料的差異 (11 個個案的生命史與陸上颱風警報期間之降雨特徵請參考附錄 A)。

在討論焚風現象之前，需先了解 CWB 和過去文獻中關於焚風發生時段之界定。根據 CWB 判斷焚風的發生，為當某地最高溫度 $T_{\max} \geq 34^{\circ}\text{C}$ ，且溫度和露點差 $T-T_d \geq 10^{\circ}\text{C}$ 。由於颱風侵台期間多伴隨降雨，溫度約在 $27\sim 28^{\circ}\text{C}$ 之間，因此若溫度突增達到 34°C 以上時，已可稱為「焚風」。CWB 並將焚風等級做分類，以某地出現之最高溫度 ($^{\circ}\text{C}$) 和最大溫度露點差值 ($^{\circ}\text{C}$) 做為依據，詳如表 2-2。郭和楊 (1982) 使用 CWB 1959~1979 年各測站之颱風侵台期間逐時溫度和相對濕度資料，將白晝 (2200 UTC~翌日 1200 UTC) 1 hr 內相對濕度下降 10% 以上且氣溫上升 1°C 以上，及夜晚 (1200 UTC~2200 UTC) 濕度降低，溫度升高者，視為焚風現象。在此需注意的是焚風現象發生與結束之判定，至目前仍未有統一標準。

研究中使用颱風侵台期間 (登陸前 24 hr~登陸後 12 hr) 花蓮、成功、台東和大武測站 (測站經緯度分布如圖 2-2) 之逐時溫度和相對濕度討論焚風現象，而焚風發生之判定參考郭和楊 (1982)。取第一次前 1 hr 內相對濕度下降 7% 以上為開始發生焚風的時間，當相對濕度 $\geq 65\%$ 時，為焚風結束時間，且焚風發生期間需

有觀測溫度達到 30 °C 以上；滿足上述條件的焚風事件於各測站之最低相對濕度分布圖請參考圖 2-3。其次，依據焚風發生期間之最低相對濕度將焚風強度畫分為三個區間：（1）55 % ≤ 弱焚風 < 65 %；（2）45 % ≤ 中焚風 < 55 %；（3）強焚風 < 45 %，東南部測站滿足弱、中及強焚風的事件數分別為 20、8 及 9 件。

2-1 侵台期間打轉之颱風

（1）楊希（1990 年 8 月）

楊希颱風於 1990 年 8 月 14 日 1800 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖顯示，18 日 0000 UTC（圖 2-4a）日本上方 140°E 附近有一呈北北東至南南西走向的中緯度槽線延伸到 35°N；而在此槽線以西，位於 35~45°N、115°E 也有一槽線；20°N、145°E 有柔拉（Zola）颱風發展，太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線勢力範圍被侷限在 145°E 以東。19 日 0000 UTC（圖 2-4b）原處於 115°E 的槽線僅東移 2°經度，而原先位於日本上方的槽線東移速度較快，到達 158°E 附近，此時太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線漸漸西伸至 131°E，但因受柔拉颱風影響，導引楊希颱風的氣流仍不明顯。19 日 1200 UTC（圖 2-4c）太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線因柔拉颱風逐漸發展的影響一分為二，高壓勢力減弱，導引楊希颱風移動之駛流仍弱。

楊希颱風於 8 月 19 日 0400~1400 UTC（即登陸後 1~11 hr）發生打轉。花蓮和大武測站分別自 18 日 0300~0500 UTC（即登陸前 24~22 hr）和 18 日 2300 UTC~19 日 0500 UTC（即登陸前 4 hr~登陸後 2 hr）觀測到弱焚風，溫度最高升至 33.4 和 33.6 °C，相對溼度最低降至 56 和 62 %（圖 2-5a 和 d）。成功測站自 19 日 0700~0900 UTC（即登陸後 4~6 hr）和 1400~1500 UTC（即登陸後 11~12 hr）皆觀測到弱焚風，溫度最高升至 32.9 和 30.8 °C，相對溼度最低降至 58 和 63 %（圖 2-5b）。台東測站自 18 日 0300~0700 UTC（即登陸前 24~20 hr）和 19 日 0100~0800 UTC

(即登陸前 2 hr~登陸後 5 hr)觀測到弱和強焚風，溫度最高升至 33.4 和 37.6 °C，相對溼度最低降至 56 和 37 % (圖 2-5c)。花蓮和台東測站於颱風登陸前一天即觀測到焚風發生，此時颱風中心最低氣壓維持 970 hPa，平均最大風速 35 ms⁻¹ (圖 2-6)；另外，成功測站於打轉期間才觀測到弱焚風，其餘測站皆在打轉發生前觀測到焚風；台東測站於颱風打轉前 3 hr 開始有強焚風發生，此時測站氣壓降至最低並伴隨降雨停止，而後颱風在台灣西北部陸地上方打轉一圈後出海。

(2) 寶莉 (1992 年 8 月)

寶莉颱風於 1992 年 8 月 27 日 0000 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖顯示，29 日 1200 UTC (圖 2-7a) 太平洋高壓脊橫亙 30~35°N，而 14°N、141°E 有一颱風正在發展。30 日 1200 UTC (圖 2-7b) 太平洋副熱帶高壓減弱一分為二。整體來看，駛流場導引颱風往西北方向移動。

寶莉颱風於 8 月 29 日 1500 UTC~30 日 0200 UTC (即登陸前 15~4 hr) 發生打轉，打轉期間的中心最低氣壓自 978 hPa 降到 975 hPa，平均最大風速 23 ms⁻¹ (圖 2-6)。寶莉為輕度颱風，環流的強度不足以發生焚風 (圖 2-8)，僅大武測站自 30 日 0200~0500 UTC (即登陸前 4~1 hr) 觀測到微弱的焚風，溫度最高升至 30.3 °C，相對溼度最低僅降到 72 % (圖 2-8d)，未達到弱焚風的門檻。

(3) 海棠 (2005 年 7 月)

海棠颱風於 2005 年 7 月 12 日 0000 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖顯示，17 日 1200 UTC (圖 2-9a) 太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線位於 30°N 附近，颱風東側與北側均為此副熱帶高壓之勢力範圍，其順著東南風駛流場往西北方向移動接近台灣。18 日 0000 UTC (圖 2-9b) 副熱帶高壓 5880 gpm 等值線勢力範圍相較於前 12 hr 幾乎維持不變，500 hPa 層之颱風中心位於台灣上方，但此

時的地面天氣圖（圖略）顯示，低層颱風中心仍在台灣東部外海，表示由於地形影響使得颱風垂直結構傾斜。

海棠颱風於 7 月 17 日 1800 UTC~18 日 0100 UTC（即登陸前 13~6 hr）發生打轉，打轉期間的中心最低氣壓維持 925 hPa，平均最大風速 51 ms^{-1} （圖 2-6）。花蓮、台東和大武測站依序自 17 日 0900~1200 UTC（即登陸前 22~19 hr）、17 日 2000 UTC~18 日 0200 UTC（即登陸前 11~5 hr）和 17 日 1800 UTC~18 日 0000 UTC（即登陸前 13~7 hr）觀測到弱、強和弱焚風，溫度最高升至 30.2、36.9 和 32.1 °C，相對溼度最低降至 59、35 和 58 %（圖 2-10a、c 和 d）；成功測站自 17 日 1000~1300 UTC（即登陸前 21~18 hr）和 17 日 2100 UTC~18 日 0100 UTC（即登陸前 10~6 hr）觀測到弱和強焚風，溫度最高升至 30.5 和 37.6 °C，相對溼度最低降至 62 和 39 %（圖 2-10b）。成功和花蓮測站在颱風打轉前 8~9 hr 即觀測到弱焚風；成功、台東和大武測站在颱風打轉期間觀測到焚風，其中前兩個測站觀測到強焚風，此時測站氣壓降至最低並伴隨降雨停止。

（4）泰利（2005 年 8 月）

泰利颱風於 2005 年 8 月 27 日 0000 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖顯示，30 日 0000 UTC（圖 2-11a）韓國東北方有一槽線往西南方延伸至 35°N、115°E 附近，太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西伸至 132°E，颱風位於此副熱帶高壓的西南象限，順著東南風駛流場往西北方向移動接近台灣，而在副熱帶高壓南南東方海面上 15°N、150°E 娜比（Nabi）颱風形成。31 日 0000 UTC（圖 2-11b）副熱帶高壓 5880 gpm 等值線持續西伸至 126°E，北方槽線東移至日本。31 日 1200 UTC（圖 2-11c）北方槽線轉為不明顯，太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西伸至 124°E，台灣北方 33°N 處有東西走向的高壓脊，颱風位於此副熱帶高壓的西南方，往西北方向移動接近台灣。颱風登陸後，9 月 1 日 0000 UTC（圖 2-11d）副熱帶高壓 5880

gpm 等值線範圍加大並緩慢西伸至 122°E，原位於台灣北方的高壓脊稍稍往西延伸 2°經度；23°N、131°E 附近，南北走向的高壓脊較前 12 hr 加深，持續導引颱風往西北方向移動。

泰利颱風於 8 月 31 日 1700~2300 UTC (即登陸前 7~1 hr) 發生打轉，打轉期間的中心最低氣壓自 925 hPa 回升到 955 hPa，平均最大風速自 51 ms⁻¹ 降到 40 ms⁻¹ (圖 2-6)。花蓮測站自 31 日 0000~0600 UTC (即登陸前 24~18 hr) 和 0800~1000 UTC (即登陸前 16~14 hr) 觀測到中和弱焚風，溫度最高升至 34.2 和 30.1 °C，相對溼度最低降至 46 和 58 % (圖 2-12a)；成功測站自 31 日 1500~1900 UTC (即登陸前 9~5 hr) 觀測到強焚風，溫度最高升至 36.4 °C，相對溼度最低降至 43 % (圖 2-12b)；台東測站自 31 日 0100~0300 UTC (即登陸前 23~21 hr)、0600~0900 UTC (即登陸前 18~15 hr) 和 1300~1900 UTC (即登陸前 11~5 hr) 依序觀測到弱、弱和強焚風，溫度最高升至 32.2、31.5 和 35.7 °C，相對溼度最低降至 59、60 和 41 % (圖 2-12c)；大武測站自 31 日 0500~0700 UTC (即登陸前 19~17 hr) 和 0900~1600 UTC (即登陸前 15~8 hr) 皆觀測到弱焚風，溫度最高升至 32.3 和 32.6 °C，相對溼度最低降至 60 和 56 % (圖 2-12d)。台東和成功測站在颱風打轉前 4 和 2 hr 觀測到顯著強焚風，持續時間約 6 和 4 hr，此時測站氣壓降至最低並伴隨降雨停止。

(5) 柯羅莎 (2007 年 10 月)

柯羅莎颱風於 2007 年 10 月 2 日 0000 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖顯示，4 日 1200 UTC (圖 2-13a) 太平洋副熱帶高壓脊線橫亙 28°N 附近，5880 gpm 等值線西伸至 96°E，柯羅莎颱風除南側外皆被高壓包圍，隨高壓邊緣往西北方向移動。5 日 0000 UTC (圖 2-13b) 副熱帶高壓勢力減弱，一分為三各佔據颱風東側、北側和西北側。5 日 1200 UTC (圖 2-13c) 僅剩東側的副熱帶高壓導引颱風往北北

西方向移動。6 日 0000~1200 UTC (圖 2-13d~e) 副熱帶高壓沒有顯著發展，導引氣流微弱。

柯羅莎颱風於 10 月 6 日 0600~1400 UTC (即登陸前 9~1 hr) 發生打轉，打轉期間的中心最低氣壓自 925 hPa 回升到 940 hPa，平均最大風速自 51 ms^{-1} 降到 45 m/s (圖 2-6)。花蓮、成功和台東測站依序自 6 日 0600~0900 UTC (即登陸前 9~6 hr)、0400~1100 UTC (即登陸前 11~4 hr) 和 0200~1500 UTC (即登陸前 13~0 hr) 觀測到強焚風，溫度最高升至 36.1、37 和 36.5 °C，相對溼度最低降至 38、33 和 35 % (圖 2-14a、b 和 c)；大武測站自 5 日 2200 UTC~6 日 0800 UTC (即登陸前 17~7 hr) 觀測到弱焚風，溫度最高升至 31.3 °C，相對溼度最低降至 59 % (圖 2-14d)。焚風多發生在颱風打轉前，其中大武測站在颱風打轉前 8 hr 觀測到焚風，而台東和成功測站也陸續於打轉前 4 和 2 hr 觀測到強焚風；花蓮測站在颱風開始打轉時發生強焚風，後三個測站於柯羅莎打轉期間的焚風效應最為顯著，此時測站氣壓降至最低並伴隨降雨停止。

(6) 辛樂克 (2008 年 9 月)

辛樂克颱風於 2008 年 9 月 8 日 1800 UTC 形成輕度颱風。CWB 之 500 hPa 天氣圖顯示，12 日 0000 UTC (圖 2-15a) 太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西側位於 148°E，中緯度槽線往南延伸至 35°N 附近。13 日 0000 UTC (圖 2-15b) 中緯度槽線東移約 5°經度，副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西伸至 125°E。14 日 0000 UTC (圖 2-15c) 中緯度槽線東移到日本北方，副熱帶高壓 5880 gpm 等值線持續往西伸展到 119°E。

辛樂克颱風於 9 月 13 日 1800 UTC~14 日 0000 UTC (即登陸後 0~6 hr) 發生打轉，打轉期間的中心最低氣壓自 940 hPa 回升到 965 hPa，平均最大風速自 45 ms^{-1} 降到 35 ms^{-1} (圖 2-6)。花蓮、成功和大武測站依序自 13 日 1700~2300 UTC

(即登陸前 1 hr~登陸後 5 hr)、13 日 1600 UTC~14 日 0000 UTC (即登陸前 2 hr~登陸後 6 hr) 和 12 日 2300 UTC~13 日 1700 UTC (即登陸前 19~1 hr) 觀測到中、弱和弱焚風，溫度最高升至 32.5、32.7 和 32 °C，相對溼度最低降至 51、56 和 56 % (圖 2-16a、b 和 d)，後者在颱風打轉前 19 hr 即觀測到焚風；而緯度較高的花蓮和成功測站則於颱風打轉前 1~2 hr 才觀測到焚風，大約維持 6~8 hr；台東測站自 13 日 0400~2100 UTC (即登陸前 14 hr~登陸後 3 hr) 觀測到強焚風，溫度最高升至 37 °C，相對溼度最低降至 38 % (圖 2-16c)，在颱風打轉前 14 hr 觀測到焚風，此時測站氣壓降至最低並伴隨降雨停止。

(7) 薔蜜 (2008 年 9 月)

薔蜜颱風於 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖顯示，27 日 0000 UTC (圖 2-17a) 中緯度槽線位於日本海附近並往南延伸到南韓南端，太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西伸至 111°E，颱風的東側和北側均為此高壓的勢力範圍，逐漸往西北方向移動。28 日 0000 UTC (圖 2-17b) 颱風北側高壓的 5880 gpm 等值線東退到 124°E，但南側則西伸至 119°E，颱風持續往西北方向移動接近台灣。28 日 1200 UTC (圖 2-17c) 太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線東退到 122°E，在 28°N、111°E 處高壓逐漸發展並有封閉高度場出現，此時颱風環流中心正要出海離開台灣。29 日 0000 UTC (圖 2-17d) 颱風出海後順著太平洋高壓邊緣往東北方向移動。

薔蜜颱風於 9 月 28 日 0740 UTC 登陸台灣，0800~1700 UTC (即登陸後 0~9 hr) 發生打轉。成功和台東測站分別自 28 日 0800~1200 UTC (即登陸後 0~4 hr) 和 0600~1200 UTC (即登陸前 2 hr~登陸後 4 hr) 觀測到中焚風，溫度最高升至 33.4 和 33.4 °C，相對溼度最低降至 51 和 47 % (圖 2-18b 和 c)；花蓮和大武測站皆無觀測到顯著焚風 (圖 2-18a 和 d)。台東和北邊的成功測站分別自颱風打轉前 2

hr 和開始打轉時觀測到焚風，此期間最高溫均低於 35 °C，颱風中心最低氣壓自 930 hPa 回升到 940 hPa，平均最大風速自 51 ms⁻¹ 降到 45 ms⁻¹（圖 2-6），而後蕃蜜在花蓮北部陸地打轉一圈後出海。

2-2 侵台期間未打轉之颱風

(1) 葛拉絲（1994 年 8 月）

葛拉絲颱風於 1994 年 8 月 24 日 0600 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖，30 日 1200 UTC（圖 2-19a）太平洋副熱帶高壓和大陸高壓合而為一，範圍從 86°E 延伸至 154°E，此時颱風位於副熱帶高壓 5880 gpm 等值線的南方，順著駛流場往西移動。31 日 0000 UTC（圖 2-19b）副熱帶高壓範圍縮減，東西方向從 99°E 延伸至 147°E，而位於副熱帶高壓南方的颱風仍往西移動。8 月 31 日 1200 UTC～9 月 1 日 0000 UTC（圖 2-19c～d）原位於台灣北部上方的 5880 gpm 等值線約往北移動 2°緯度，此階段颱風大致往西北西或西北方向移動。

葛拉絲颱風於 9 月 1 日 0250 UTC 登陸台灣，侵台期間中心最低氣壓自 970 hPa 回升到 975 hPa，平均最大風速自 35 ms⁻¹ 降至 33 ms⁻¹（圖 2-6）。成功、台東和大武測站依序自 8 月 31 日 2200 UTC～9 月 1 日 0400 UTC（即登陸前 5 hr～登陸後 1 hr）、9 月 1 日 0100～0500 UTC（即登陸前 2 hr～登陸後 2 hr）和 8 月 31 日 1900 UTC～9 月 1 日 0900 UTC（即登陸前 8 hr～登陸後 6 hr）觀測到弱、中和中焚風，溫度最高升至 30.4、30.9 和 32.9 °C，相對溼度最低降至 61、54 和 49 %（圖 2-20b、c 和 d）；花蓮測站無觀測到焚風（圖 2-20a）。

(2) 納坦（2004 年 10 月）

納坦颱風於 2004 年 10 月 16 日 1200 UTC 形成輕度颱風。CWB 24 日 0000 UTC

(圖 2-21a) 500 hPa 天氣圖顯示，納坦颱風處於太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線的範圍內，和其餘個案相比，環境場的太平洋高壓較強，因此討論 700 hPa 的天氣圖。24 日 0000 UTC(圖 2-21b) 700 hPa 天氣圖顯示，納坦颱風位於 19°N、126°E，其北方的副熱帶高壓 1016 gpm 等值線圍繞著颱風的東方和北方，颱風順著高壓邊緣往西北西移動。24 日 1200 UTC (圖 2-21c) 副熱帶高壓 1016 gpm 等值線相較前 12 hr 往北移動 1°緯度，颱風轉為朝西北方向移動。25 日 1200 UTC (圖 2-21d) 高壓漸漸東退到颱風的東側，颱風此時位於 26°N、122°E 順著高壓邊緣往東北方向移動離開台灣。

納坦颱風於 10 月 25 日 0230 UTC 登陸台灣，侵台期間中心最低氣壓自 950 hPa 回升到 965 hPa，平均最大風速自 40 ms^{-1} 降至 35 ms^{-1} (圖 2-6)。台東測站自 25 日 0000~0400 UTC (即登陸前 3 hr~登陸後 1 hr) 觀測到弱焚風，溫度最高升至 31.1 °C，相對溼度最低降至 62 % (圖 2-22c)；大武測站自 24 日 1600~2200 UTC (即登陸前 11~5 hr) 和 25 日 0000~0700 UTC (即登陸前 3 hr~登陸後 4 hr) 觀測到中焚風，溫度最高升至 30.3 和 32.1 °C，相對溼度最低降至 45 和 54 % (圖 2-22d)；花蓮和成功測站無觀測到焚風 (圖 2-22a 和 b)。

(3) 碧利斯 (2006 年 7 月)

碧利斯颱風於 2006 年 7 月 9 日 0600 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖顯示，12 日 0000 UTC (圖 2-23a) 和 13 日 0000 UTC (圖 2-23b) 38~50°N 有中緯度低壓槽通過 120°E，使得颱風東北象限的太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線勢力範圍縮減，颱風仍受東南風駛流場影響往西北方向移動。13 日 1200 UTC (圖 2-23c) 及 14 日 0000 UTC (圖 2-23d) 太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線呈現東西走向位於台灣北方 35°N 附近，颱風順著東南風駛流場往西北方向移動通過台灣。

碧利斯颱風於 7 月 13 日 1420 UTC 登陸台灣，侵台期間其中心最低氣壓維持 978 hPa，平均最大風速 25 ms^{-1} (圖 2-6)，花蓮和大武測站分別自 13 日 0000~0200 UTC (即登陸前 15~13 hr) 和 0800~1000 UTC (即登陸前 7~5 hr) 觀測到弱焚風，溫度最高升至 31.6 和 31.8 °C，相對溼度最低降至 62 和 63 % (圖 2-24a 和 d)；成功和台東測站皆無觀測到焚風 (圖 2-24b 和 c)。

(4) 卡玫基 (2008 年 7 月)

卡玫基颱風於 2008 年 7 月 15 日 1200 UTC 形成輕度颱風。CWB 500 hPa 天氣圖顯示，16 日 0000 UTC (圖 2-25a) 中緯度低壓槽位於黃海和渤海附近，太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線範圍不大，往西北方向延伸呈狹長狀，在東西和南北方向大約 15° 經緯度。17 日 0000 UTC (圖 2-25b) 中緯度低壓槽東移至韓國上方，太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西伸接近 130°E，颱風此時往西北方向移動，但無觀察到封閉等高線，有減弱的趨勢。18 日 0000 UTC (圖 2-25c) 太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線持續西伸至 124°E，此時颱風環流中心離開台灣並往西北方向移動。

卡玫基颱風於 7 月 17 日 1340 UTC 登陸台灣，侵台期間其中心最低氣壓自 970 hPa 回升到 990 hPa，平均最大風速自 33 ms^{-1} 降至 23 ms^{-1} (圖 2-6)，環流強度不足以誘發焚風 (圖 2-26)。

2-3 選取個案之綜合分析

本章重點在比較具相似西北行路徑之打轉 (楊希, 1990; 寶莉, 1992; 海棠, 2005; 泰利, 2005; 柯羅莎, 2007; 辛樂克, 2008; 薔蜜, 2008) 與未打轉 (葛拉絲, 1994; 納坦, 2004; 碧利斯, 2006; 卡玫基, 2008) 颱風在觀測資料的差異，所有個案於侵台期間之綜觀特徵摘要，如表 2-3 所示。綜合而言，多數颱風所

處環境之東南風駛流場較顯著，導引颱風往西北方向移動並接近台灣。楊希和寶莉颱風兩者皆受另一颱風發展影響，使太平洋副熱帶高壓減弱並分裂。多數個案的太平洋副熱帶高壓脊線（5880 gpm 等值線）呈現東-西（或東北東-西南西）走向、且主要位於 28~35°N、95~130°E 之間（寶莉、海棠、泰利、碧利斯、柯羅莎和薔蜜颱風）。納坦相較於其他颱風，環境場太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線範圍較廣。分析顯示，相似西北行路徑之侵台颱風，在綜觀環境場並無顯著的差異，但打轉與未打轉個案在行經 23.6°N 至登陸時的路徑走向分別呈「西北至西北西方向」與「北北西方向」，因此西北行至台灣宜蘭或花蓮外海之颱風，侵台期間打轉與否，和接近台灣地形時之路徑走向的細微差異似有關聯。打轉颱風在打轉前的平均移速大都比未打轉颱風登陸前的平均移速慢；其中，辛樂克颱風移速相當慢，打轉前 24 hr 平均移速僅 8.3 km h^{-1} （圖 2-27）。

本研究使用颱風侵台期間東南部測站的逐時溫度和相對濕度，做為判斷焚風發生的依據，分析顯示西北走向侵台颱風於台灣東方近海發生打轉時，颱風持續滯留使得環流不斷地越山後下沉，於登陸前極易誘發東南部地區大規模焚風，花蓮、成功、台東和大武測站均有詳細逐時溫度和相對濕度變化之觀測資料可供驗證此現象（詳如 2-1 節）。歸納結果顯示，生命史曾發展至強颱風的打轉個案，在打轉開始前（泰利、柯羅莎、辛樂克和薔蜜）或打轉時（海棠）東南部地區花蓮、成功和台東測站大都會觀測到強或中焚風。而侵台期間未打轉的颱風，於東南部各測站之焚風發生頻率與強度大都小於打轉個案。

表 2-4 為侵台期間發生打轉（7 個個案）和未打轉之颱風（4 個個案）於台灣東南部測站的觀測資料綜整，表中顯示，多數打轉個案曾發生最高溫度大於 35 °C 的現象，如楊希颱風侵台時，台東測站觀測到 37.6 °C 的高溫，海棠颱風侵台時，於台東和成功測站依序觀測到 36.9 和 37.6 °C 的高溫，泰利颱風侵台時，於台東和成功測站依序觀測到 35.7 °C 和 36.4 °C 的高溫，柯羅莎颱風侵台時，於台東、成功

和花蓮測站依序觀測到 36.5 °C、37 °C 和 36.1 °C 的高溫，辛樂克颱風侵台時，於台東測站觀測到 37 °C 的高溫。未打轉個案，則未觀測到溫度大於 35 °C 之現象。整體而言，大武測站較易發生輕微的焚風，而觀測到焚風的測站，焚風現象大都在颱風登陸前出現，僅成功站在楊希颱風登陸後才發生焚風。因此，東南部地區發生焚風的時機除了颱風強度需適當外，颱風中心必須十分靠近東北部陸地，讓環流能繞到 CMR 西側爬升，越山後再下沉而使背風側的東南部測站溫度上升和相對濕度下降，並產生範圍廣但深度淺的背風槽(呈北北東至南南西走向)。當強風持續時，背風槽就能維持一段時間，且背風槽中可同時存在數個微弱低壓中心；此背風槽似可幫助颱風路徑之突然南偏。此外，有時在焚風最強處，可生成一副中心，如莎拉 (1989) 颱風。焚風使局地產生加熱，氣壓降低，雖然此低層低壓發展的可能性很小，但可能有利於颱風往此方向偏折；辛樂克 (2008) 在侵台期間於蘇澳外海發生 (直徑約 25 km) 小範圍氣旋式打轉，有可能受到此焚風現象的影響 (花蓮、成功、台東和大武站皆於颱風打轉前觀測到焚風現象)，將利用後續模擬結果分析打轉現象與焚風效應的伴隨關係。

辛樂克 (2008) 和 薔蜜 (2008) 同屬 9 月之具備極為相似西北行路徑的強颱，其中前者於登陸前減弱至中度颱風，但後者仍為強颱；理論上，薔蜜颱風的環流強度應更易誘發台灣東南部發生焚風，但在實際觀測上，反而是強度稍弱的辛樂克颱風在花蓮、成功、台東和大武站觀測到更顯著的焚風發生，而薔蜜颱風僅於成功和台東站觀測到中焚風。推測原因，除了辛樂克颱風移速緩慢外，可能也和其侵襲台灣的路徑方向有關。辛樂克颱風登陸位置比薔蜜颱風北偏約 0.2° 緯度，且在其行經 23.6°N 後至登陸時的路徑大約呈西北方向；而薔蜜颱風較傾向北北西走向，故於相同緯度時，其中心較接近台灣東南部沿岸地區。辛樂克颱風於打轉前 14 hr 即開始在台東測站觀測到顯著的焚風發生，局地最大增溫達 37 °C，氣壓也下降 2.3 hPa，因此，颱風似可能受到台灣東南部地區顯著增溫現象，而往南移動。

辛樂克 (2008)、柯羅莎 (2007) 和泰利 (2005) 等三個颱風，其打轉的路徑幾乎貼著台灣地形邊界，且都在打轉前數小時於東南部測站觀測到焚風發生，因此打轉現象與台灣東南部局地加熱之相關性值得進一步分析。海棠 (2005) 颱風在距離台灣地形 0.4° 經度即開始打轉，在打轉前由於颱風環流距離台灣較遠和受到地形阻擋，只發生弱焚風 (花蓮、成功和大武測站)，直到颱風開始打轉期間，由於中心逐漸靠近台灣，成功和台東測站才有強焚風產生，此颱風的打轉和通道效應所導致的北風噴流相關性較大 (Jian and Wu, 2008)，但在打轉期間所產生的局地加熱，對於颱風的打轉維持有加強之效果。蕃蜜 (2008) 颱風登陸後在台灣陸地上方打轉一圈後出海，在打轉發生前，成功和台東測站觀測到中焚風。輕颱寶莉 (1992) 在距離台灣地形 0.4° 經度開始打轉，環流較弱情況下並無發生焚風，顯示其打轉發生與台灣東南部之熱力效應無關聯。而楊希 (1990) 颱風打轉前雖於台東測站觀測到強焚風，但由於打轉過程發生在台灣西北部陸地 (山脈西側)，其打轉之物理機制與山前的打轉者不同，因此與焚風效應無關聯。



第三章 辛樂克颱風侵台期間之模擬與校驗

觀測資料分析有助於了解侵台颱風所處的綜觀環境場特徵、對流雲系分布及實際量測到的降水量。台灣地區的觀測網密度相較於國外已非常高，但海上的測站數目遠少於陸地測站，所以在颱風離台灣尚遠時仍需仰賴衛星的觀測。颱風移向主要受駛流導引，但若遇到台灣地形時，經常發生較小尺度之突然偏向、滯留或是打轉，無法僅用駛流解釋；再者受限於觀測資料之不足，直至目前，仍無法使用現有觀測資料，分析颱風小尺度路徑打轉的物理過程。因此，本研究選取一個近年於侵台期間發生打轉的個案(Sinlaku, 2008)，使用高解析中尺度模式(WRF)進行模擬，在選用合適的積雲及雲微物理參數化後，模擬的綜觀場、中小尺度及降水現象接近觀測；透過此模擬結果的診斷分析，將有助於了解此個案的打轉現象，並可用以探討颱風靠近地形時路徑發生打轉之物理機制。

辛樂克颱風是 CWB 2008 年編號第 13 號颱風，於 9 月 13~15 日影響台灣本島。圖 3-1 為此颱風移動路徑，9 月 8 日 0000 UTC~10 日 1200 UTC 沿北北西方向移動，隨後至 12 日 0000 UTC 朝北北東轉北北西方向移動，接著沿西北走向接近台灣並於 13 日 1750 UTC 登陸宜蘭蘭陽溪，登陸後至 14 日 0000 UTC 在蘇澳與蘇澳外海滯留打轉，而後通過台灣東北角到北部外海處再打轉一圈，才往東北方遠離台灣。圖 3-2 為辛樂克颱風生命期的強度變化圖，分別使用美軍聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC)、日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency, JMA) 和 CWB 每 6 hr 的強度資訊。需注意的是地面最大風速的測定，美國 JTWC 是採用一分鐘平均最大風速值，而 JMA 和 CWB 為十分鐘平均最大風速值，因此 JTWC 所顯示的平均最大風速在多數時刻皆會高於 JMA 和 CWB，以下討論根據 JMA 的數值。JMA 資料顯示，10 日 1200 UTC~11 日 1200 UTC 是颱風最強時段，中心最低氣壓值 935 hPa，平均最大風速 51.5 ms^{-1} ，已達到強烈颱風標準 (最大風速達 51.0 ms^{-1} 以上)。辛樂克之強度自 11 日 1200 UTC 後開始減弱，

到登陸時（13日 1750 UTC，圖 3-2 中紅色箭頭處）平均最大風速約 41.5 ms^{-1} ，已減弱為中度颱風（最大風速介於 $32.7 \sim 50.9 \text{ ms}^{-1}$ ）。

3-1 數值模式介紹

本研究使用 WRF V3.1.1 進行辛樂克颱風的模擬實驗。WRF-ARW（Advanced Research version of the Weather Research and Forecasting，其流程圖請參考圖 3-3）為中尺度數值天氣預報系統，是由 NCAR（National Center for Atmospheric Research）、NCEP（National Centers for Environmental Prediction）、FSL（Forecast System Laboratory）、AFWA（Air Force Weather Agency）和 FAA（Federal Aviation Administration）等單位所共同發展。WRF 模式可模擬中小尺度的天氣現象，主要用於數值預報及大氣科學研究，為完全可壓縮與非靜力模式，採用 Arakawa C 網格，特色為把各個速度變數（ u 和 v ）置於熱力變數（ m ）前後左右上下 0.5 網格處，如圖 3-4 所示，呈現交錯網格架構；垂直方向為 η （eta）座標，乃追隨地勢質量座標（Terrain-following mass vertical coordinate），結合了氣壓座標與 σ （sigma）座標。 η 之值介於 0 與 1 之間，如圖 3-5 所示，相當於 MM5 的 σ 座標，等 σ 面在低層與地形起伏一致，向上逐漸變平。 η 定義如下：

$$\eta = p_h - p_{ht} / \mu$$

$$\mu = p_{hs} - p_{ht}$$

P_h 是指靜力平衡的壓力（hydrostatic pressure）， P_{hs} 及 P_{ht} 分別為參考狀態的地表及頂層壓力， P_{ht} 不隨時間改變，為一定值。在進行 WRF 模擬前，需先將觀測資料內插至 WRF 模式的網格點，以產生模式初始場（包含地形、區域邊界和網域範圍），此稱為 WPS（WRF Preprocessing System），即資料處理系統，上述完成後再由 WRF 模式進行模擬。

3-2 模式設定

研究過程中使用不同初始時間、巢狀網格和物理參數化進行辛樂克颱風之模擬，並選擇最接近真實颱風的模擬結果為控制組 (CTRL)，並進行分析和討論，控制組實驗之設定如下：(1) 積分時間為2008年9月12日0000 UTC~15日0000 UTC，共72 hr。(2) 採用三層巢狀網格進行模擬，其網格配置如圖3-6所示，第一、二和三層網格間距依序為36、12和4 km，涵蓋範圍依序是5508 km × 5508 km (154點×154點)、3132 km × 3132 km (262點×262點) 和828 km × 828 km (208點×208點)，而時間步長各為120、40及13.33秒，第一層網格中心位於26°N、129°E。(3) 垂直方向使用 η 座標，有31層 ($\eta = 1.0000、0.9930、0.9830、0.9700、0.9540、0.9340、0.9090、0.8800、0.8362、0.7923、0.7485、0.7047、0.6277、0.5573、0.4928、0.4340、0.3803、0.3315、0.2871、0.2469、0.2105、0.1776、0.1479、0.1213、0.0974、0.0760、0.0569、0.0399、0.0249、0.0117、0$)。(4) 地形及經緯度採用麥卡托投影。(5) 物理參數化方面，微物理參數化採用Ferrier (new Eta) microphysics (Rogers et al., 2001)、積雲參數化使用Grell-Devenyi ensemble scheme (Grell and Devenyi, 2002)、邊界層參數化採用Yonsei University scheme (Hong and Pan, 1996)、長波參數化採用Rapid Radiative Transfer Model (Mlawer et al., 1997)、短波參數化採用Dudhia scheme (Dudhia, 1989)，其中第三層不使用積雲參數法。本研究第一、二和三層網格皆使用30秒 (約0.9 km) 解析度的地形資料，圖3-7為CTRL實驗4 km解析度的台灣地形圖，其大都能掌握台灣實際地形的主要特徵，但模式的最高地形約3,200 m，而真實玉山頂峰最高達3,997 m，模式地形仍稍稍偏低。

3-3 資料來源及渦旋植入

初始場與邊界條件資料使用美國NCEP-GFS (National Center for Environmental Prediction Global Forecast System) 的分析場與預報場，其水平解析為 $1^\circ \times 1^\circ$ ，時間

解析度為6 hr，垂直方向有27層（Surface、1000、975、950、925、900、850、800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa）。由於研究使用的初始場資料其網格解析度僅約110 km，尚不足以解析颱風中小尺度的環流特徵，假使無植入一虛擬渦旋進入模式初始場中，預期將會低估颱風的強度以及減弱颱風與地形交互作用之對流現象，減低科學研究的探討價值。過去的文獻中，簡與李（2002）、李與張（2003）、Wu（2001）、Wu et al.（2002）和Jian et al.（2006）均將模擬的初始場中植入適當渦旋且針對真實侵台之颱風個案做討論，結果顯示渦旋植入後對於颱風中尺度環流、路徑及降雨現象之表現能有更合理的掌握。

本研究在渦旋植入的設定上，使用 WRF V3.1.1 內建植入渦旋的功能，只需給定渦旋中心經緯度、最大風速、最大風速半徑和颱風結構參數（ α ）即可， α 代表渦旋最大風速半徑外之風速強度， α 值愈大表示風速剖面值愈小。研究中僅在第三層巢狀網格植入虛擬渦旋，選用 9 月 12 日 0000 UTC 美國 NCEP-GFS 的分析場之颱風經緯度位置 22.7°N、124.3°E，當作虛擬渦旋的植入點，最大風速設定 80 ms^{-1} ，最大風速半徑設為 70 km 和 α 為 0.7。關於虛擬渦旋的最大風速，研究中亦使用較小風速進行模擬，但結果顯示模擬的路徑與最低氣壓值仍以設定 80 ms^{-1} 者較接近觀測資料，故選用此數值做為虛擬渦旋的最大風速。

圖 3-8 和圖 3-9 為渦旋植入前、後之風場分布，植入前由美國 NCEP-GFS 的分析場解析之颱風結構如圖 3-8a、c、e 和圖 3-9a，其最大風速於 500 hPa 有 30 ms^{-1} 、850 hPa 有 40 ms^{-1} 、22.7°N 切向風場垂直剖面於 850 hPa 有 40 ms^{-1} 和 22.7°N、126°E 之 850 hPa 處有 40 ms^{-1} ，且強風速區較分散，最大風速約距颱風中心 1.5°經度，而此時 JTWC 的颱風平均最大風速為 59.2 ms^{-1} ，若使用此初始場模擬颱風結構，對於颱風強度會有低估的狀況，以致無法針對颱風侵台時之特徵做合理分析。因此，植入適當的渦旋到模式初始場資料中，透過模擬積分後，更能合理掌握真實颱風

的風場結構，如圖 3-8b、d、f 和圖 3-9b 為植入渦旋後的風場，其最大風速於 500 hPa 有 55 ms^{-1} 、850 hPa 有 70 ms^{-1} 、 22.7°N 切向風場垂直剖面於 800~900 hPa 間有 70 ms^{-1} 和 22.7°N 、 125°E 之 850 hPa 處達 72 ms^{-1} ，且強風速區較集中，最大風速約距颱風中心 0.7° 經度。

3-4 控制組模擬結果校驗

為確認模擬結果之合理性，需先進行模擬結果驗證比對，故本節校驗辛樂克颱風的模擬結果，包含綜觀天氣型態、路徑、強度、中尺度環流和侵台期間之降雨分布。

圖 3-10 為 CWB 9 月 13 日 0000 UTC (颱風登陸前) 和 14 日 0000 UTC (登陸後) 的地面天氣圖及對應時間的模擬地面天氣圖，圖中顯示 13 日 0000 UTC 太平洋副熱帶高壓中心位於 40°N 、 169°E ，24 hr 後副熱帶高壓中心僅往南移動 4° 緯度，其 1012 hPa 等壓線也往南往西擴張 $2\sim 3^\circ$ 經緯度；控制組模擬也有上述現象 (圖 3-10 紅色箭頭處)，且在 1008 hPa 和 1016 hPa 等壓線的分布上，模擬結果也與分析場相似。

圖 3-11a 為 CWB 和模式模擬 850 hPa 的環流中心逐時路徑，圖中顯示 12 日 0600 UTC~13 日 0600 UTC 植入之虛擬渦旋尚在調整階段，因此其路徑與觀測不一致，存在模式調整問題；13 日 0600 UTC~15 日 0000 UTC 模擬之路徑特徵和實際觀測結果相當接近，但位置比觀測偏南約 0.3° 緯度。模擬掌握到颱風路徑以西北方向移動並登陸台灣，且登陸後在陸地至鄰近外海打轉一圈，接著通過台灣東北部陸地，並於北部出海。觀測資料顯示辛樂克颱風於 13 日 1750 UTC 在宜蘭蘭陽溪附近登陸後，於 1800~2200 UTC 颱風往南偏移，從 24.7°N 移至 24.4°N 歷時 4 hr，而後於 2200 UTC~14 日 0000 UTC 往北氣旋式偏移，自 24.4°N 移到 24.6°N 歷時 2 hr，打轉一圈約歷時 6 hr，隨後通過台灣東北角進入北部海面。模擬颱風於 13 日 2000 UTC 登陸，相

較於觀測晚了2 hr且登陸地點南移 0.2° 緯度，同樣在登陸後路徑往南偏移，2000~2200 UTC颱風往南偏移，從 24.5°N 移至 24.3°N 歷時2 hr，而後於2200 UTC~14日0000 UTC往北氣旋式偏移，自 24.3°N 移到 24.5°N 歷時2 hr。整體來看，模擬颱風打轉的時間、位置及環流中心的移動方向均和實際觀測相當接近。圖3-11b為CWB和模擬 $\eta=0.88\sim 0.993$ 之逐時平均渦度中心路徑，圖中顯示颱風於13日1900 UTC登陸，登陸後立即打轉一圈，約歷時5 hr。之後除討論渦度收支使用圖3-11b之模擬颱風路徑外，其餘皆用圖3-11a之850 hPa的環流中心逐時路徑。

圖3-12為控制組模擬颱風之路徑誤差，結果顯示，12日0600 UTC~15日0000 UTC的平均誤差為63.5 km，13日0600 UTC之前的路徑誤差較大，皆大於平均誤差；而後至15日0000 UTC的路徑誤差較小，大都小於平均誤差，尤其是模擬颱風打轉期間13日2000 UTC~14日0000 UTC的路徑誤差僅10~20 km。圖3-13為模擬與觀測之移速變化，圖中顯示辛樂克颱風於12日0600 UTC~15日0000 UTC移速十分緩慢，僅14日0000~0600 UTC較快，達到 35.2 ms^{-1} 。颱風打轉前（13日1200~1800 UTC）至打轉期間（13日1800 UTC~14日0000 UTC），觀測的移速自 20.6 ms^{-1} 降到 2.8 ms^{-1} ；模擬颱風也有移速減慢的趨勢，自 16.7 ms^{-1} 降到 6.4 ms^{-1} 。

比較模擬與觀測颱風之中心最低氣壓（圖3-14），12日0600 UTC模擬的氣壓值為946 hPa，和JMA僅差4 hPa，隨著積分時間增加，模擬和JMA的誤差都在15 hPa以內，尤其在13日1800 UTC~15日0000 UTC模擬和JMA的誤差在5 hPa以內；12日0600 UTC~15日0000 UTC模擬颱風的氣壓值約比JTWC高10~20 hPa；而於颱風侵台期間，CWB的颱風最低氣壓值多數時間較JMA和JTWC低。

比較模擬與觀測之雷達回波圖時，由於模擬颱風登陸時間較觀測晚2 hr，因此進行比較時取「觀測時間+2 hr」之模式回波圖與觀測進行校驗。颱風登陸前，模擬的對流範圍與觀測相似（圖3-15a和b），同樣在迎風面東北部和北部山區有較

大的回波值，最大值達 55 dBZ。6 hr 後（圖 3-15c 和 d），觀測的颱風眼轉小，而模擬也有此現象發生，且模式在臺灣東北部和北部山區的對流也有掌握到。圖 3-15e 和 f 為颱風登陸前 1 hr 之回波圖，觀測顯示在接近台灣地形時，颱風結構受到破壞，眼已不可辨識；模擬的颱風眼雖然比前 5 hr 小，但依然清晰可見。颱風登陸後打轉時段之雷達回波圖（圖 3-15 g~n），模擬同觀測在全台各地皆有明顯回波值，最大值達 55 dBZ。

颱風的結構、運動和伴隨風場受多重尺度間交互作用以及台灣地形影響，其中的動力和雲物理過程十分的複雜，而且觀測資料在時間和空間上無法連續，因此即便中尺度數值模式再先進，仍有太多小尺度的現象無法解析，所以本節主要檢視模擬與觀測在降雨分布型態的異同，而非做定量的討論。此部分將累積雨量的時間分成「登陸前」、「登陸期間」和「出海後」。圖 3-16 為模擬結果與觀測之辛樂克颱風累積雨量圖，圖 3-16a 和 b 為登陸前（共 41 hr）的累積雨量，模擬結果跟觀測都在東北部宜蘭地區有較大降水，達到 700 mm 以上；但在台北、桃竹苗山區和南投地區模式則低估降水。圖 3-16c 和 d 為登陸期間（4 hr）之累積雨量，觀測的雨量較大值分布在台北、宜蘭的交界（約 250 mm）和嘉義阿里山區（約 200 mm）；模式表現為在宜蘭（約 300 mm）和南投地區（約 200 mm）有雨量較大值。圖 3-16e 和 f 為累積颱風出海後 27 hr 之雨量，模式同觀測皆於中央山脈和其山麓有雨量的大值，但模擬雨量達到 700 mm 以上的範圍較觀測少。圖 3-16g 和 h 為辛樂克颱風侵台期間之觀測和模擬總累積雨量，顯示模式降水分布和觀測類似，在東南部以及西南部沿岸的降水皆較少，主要的降水都從北部延伸到中南部山區，但模擬雨量達到 1500 mm 以上的範圍較觀測少。

第四章 辛樂克颱風登陸後打轉之物理機制探討

觀測資料顯示，辛樂克(2008)於9月13日1750 UTC登陸宜蘭縣蘭陽溪後，向南偏並打轉一圈，共歷時6 hr；本章主要利用模擬結果討論此颱風在侵台期間發生打轉的物理機制。

首先分析辛樂克颱風 CTRL 模擬之不同高度層 850、700 和 500 hPa 的環流中心逐時路徑(圖 4-1)。圖中顯示，850 hPa 層環流中心移速較快，應與低層氣流在接近地形過程中，受到阻擋而產生較顯著的繞流現象有關(Chang, 1982)，使其移速比高層 700 hPa 和 500 hPa 快。再者，此三層的環流中心均有發生打轉，其中 700 hPa 層在 13 日 1900 UTC 最先往南偏向逆時針打轉一圈，於 2300 UTC 逐漸往西北方向行進，而 850 hPa 和 500 hPa 層在 2000 UTC 才開始南偏打轉，自 14 日 0000 UTC 逐漸往西北方向行進，三層之打轉時間都各約 4 hr。整體來看，低層(850 hPa)環流中心開始南偏前，中低層(700 hPa)環流中心已先反應未來將要轉向之特徵，且愈低層的轉圈範圍愈大也愈接近台灣地形，此似與其受較顯著之地形阻擋有關。

本章將分析 CTRL 模擬颱風於打轉期間的低層溫度、濕度、風場之變化及渦度收支，而最末小節將分析另一對照組模擬的結果，該模擬僅改變植入虛擬渦旋的最大風速半徑(R_{max})，其餘設定同 CTRL；對照組模擬的颱風於侵台期間未打轉，故比較控制組和對照組模擬之差別，將有助於了解辛樂克颱風的打轉原因。

4-1 環境場熱力效應對颱風打轉的影響

圖 4-2 為控制組模擬之海平面氣壓場，需留意山區的值乃地面氣壓經由靜力平衡假設推算而得，因此，隨地勢增高氣壓值誤差可能會愈大。圖中顯示，隨颱風登陸台灣並發生打轉期間，台灣東部產生範圍廣但深度淺之低壓槽，裡面有數個

微弱低壓中心，為氣流過山時經沉降增溫作用所導致，不易繼續發展。圖 4-3 是近地層 ($\eta = 0.993$) 控制組模擬之水平風場向量、溫度和相對溼度，圖中顯示颱風北方區域和 CMR 西側的濕度高達 95 % 以上，台灣東部陸地、東和東南部海域相對濕度較低，溫度較高。13 日 1800 UTC (圖 4-3a) 颱風中心的濕度高達 95 % 以上，紫虛線範圍內 (22.8°N 、 121.4°E 附近) 溫度達到 36°C ，相對濕度介於 30~35 %。1900 UTC (圖 4-3b) 颱風中心溼度較前 1 hr 稍微降低，紫虛線範圍內 (22.8°N 、 121.4°E 附近) 溫度達到 36°C ，相對濕度達介於 25~35 %。2000 UTC (圖 4-3c) 颱風中心溼度較前 1 hr 稍微降低 5 %，紫虛線範圍內 (22.9°N 、 121.4°E 附近) 溫度最高達 38°C ，相對濕度介於 25~35 %，此時颱風正由原先西北行路徑轉向，逐漸朝西南方移動。2100 UTC (圖 4-3d) 台灣東南方海域仍有溫度高達 36°C ，相對濕度達介於 30~35 % (紫虛線內) 的乾熱空氣，颱風路徑正逐漸往東南方偏轉。2200~2300 UTC (圖 4-3e~f) 台灣東南方海域不再有達 36°C 的高溫，相對濕度最低介於 35~40 %，颱風停止南偏，逐漸往東北至北北西移動。

上述分析顯示，颱風打轉前~往南偏移期間 (圖 4-3a~d) 台灣東南部海域近海面有介於 $36\sim 38^{\circ}\text{C}$ 的高溫，最低相對濕度介於 25~35 %；而當颱風停止南偏，並逐漸往北移動時 (圖 4-3e~f)，東南部海域最高溫度未達 36°C ，相對濕度也較打轉前或南偏期間高。因此，颱風環流爬山後在台灣東南部近地層形成廣大範圍的乾熱區，當此區之高溫和低濕達一定程度與範圍後，似可導致颱風路徑的偏移或打轉。圖 4-3d~f 中 (2100~2300 UTC)，高溫 (大於 30°C)、低濕度 (低於 65 %) 的乾熱空氣甚能直接到達至颱風中心 (圖中紅虛線處)；過去研究較少提及大範圍乾熱空氣存在之熱力效應對於颱風路徑的影響程度。

圖 4-4 為低層 ($\eta = 0.8362$) 的環境場，圖中顯示仍有颱風北方區域和 CMR 西側之濕度較高的趨勢，達到 95 % 以上，但範圍較近地層縮減，颱風中心的相對濕度較近地層低，約 60 %；而在台灣東南方海面上的低濕度範圍較近地層廣，但

強度稍弱，相對溼度介於 30~65 % 之間，與近地層比較後，隨著颱風南偏打轉過程，乾空氣鮮少接近颱風環流中心，顯示焚風效應在近地面附近較為顯著。

4-2 打轉期間風場演變

過去研究文獻顯示，颱風本身具有強的慣性穩定度，其接近地形時，在靠近地形方向之颱風低層流場會有加速的情形，引起通道效應 (Jian and Wu, 2008)。當颱風中心與地形邊界尚有一段距離時，通道效應理應發生，如海棠 (2005) 颱風在距離台灣地形 0.4° 經度即開始打轉，明顯受通道效應影響 (Jian and Wu, 2008)，但觀測顯示辛樂克登陸後才在蘇澳至蘇澳外海滯留打轉，應有其他非通道效應主宰的因素導致其南偏打轉。以下先討論辛樂克颱風打轉期間之低層與中低層的風場變化，分析風場改變與颱風路徑方向的相關性。

圖 4-5 為模擬颱風的低層風場資料，圖中顯示，13 日 1300 UTC 時風場呈現不對稱分布，颱風東側風速較強，達到 53 ms^{-1} 以上，此時颱風往西北方向移動 (圖 4-5a)。1500 UTC (圖 4-5b) 強風速區延伸到颱風中心的北側和西側，最大達到 53 ms^{-1} 以上，颱風朝北北西方向移動，仍未開始往南偏向。1700 UTC (圖 4-5c) 颱風西側環流受到地形破壞，風速減弱到 $45 \sim 48 \text{ ms}^{-1}$ ，東側風速較強，達到 53 ms^{-1} 以上，颱風朝西北西方向偏移。1900 UTC (圖 4-5d) 颱風強風速區移到東北側，介於 $51 \sim 53 \text{ ms}^{-1}$ ，而颱風西北西方向有小範圍達到 $45 \sim 48 \text{ ms}^{-1}$ 的強風速區，颱風仍朝西北西方向移動。2000 UTC (圖 4-5e) 颱風東側風速減弱到 45 ms^{-1} 以下，東西側風速相當，颱風北北西側強風速達 $45 \sim 48 \text{ ms}^{-1}$ 的範圍增加，此時颱風開始往西南方偏移。2100 UTC (圖 4-5f) 颱風東西側風速相當，最大達到 42 ms^{-1} ，颱風往東南方偏移。2200 UTC (圖 4-5g) 颱風西側風速減弱，而東南側的風速維持在 42 ms^{-1} 以下，颱風轉往東北方向移動。2300 UTC 時 (圖 4-5h) 颱風風速減弱，東側比西側強 15 ms^{-1} ，颱風朝北北西方向移動。14 日 0000 UTC (圖 4-5i) 颱風東側

風速仍比西側強，路徑往北北西方向移動。

分析控制組模擬中低層 $\eta = 0.6277 \sim 0.8362$ (約 640~820 hPa) 之平均風場變化 (圖 4-6)，結果顯示和低層類似，在颱風距離台灣尚遠還未打轉時，風場以颱風東側較強，最大達到 53 ms^{-1} (圖 4-6a)；2 hr 後，因受地形阻擋，颱風中心西側風速最大達到 51 ms^{-1} ，但颱風仍往北北西方向行進，並未開始南偏打轉 (圖 4-6b)。隨颱風愈接近地形，其結構受到破壞 (圖 4-6c~d)，風場逐漸減弱，當颱風中心東西兩側的風速相當時 (圖 4-6e~g)，颱風開始往南偏向打轉。

上述分析顯示，辛樂克颱風接近地形時，其低層和中低層環流中心西側的強風速區 (圖 4-5b 和 4-6b) 與東側風速相近，中心西側的北風噴流不顯著，路徑仍往西北方移動，而當模擬颱風登陸時 (13 日 2000 UTC)，受地形影響使中心西北側風速增加並高於東側 (圖 4-5e)，才逐漸導引颱風往西南方偏移，此可合理推測颱風未來之移動方向，與目前所處之風場特徵極為相關。

低層 $\eta = 0.88 \sim 0.993$ (約 880~990 hPa) 之平均水平輻散場如圖 4-7 所示，13 日 1900 UTC 颱風南側有達到 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的輻合極大值區 (圖 4-7a)，隨時間逐漸發展並增加到 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (圖 4-7b)，而中心東側的輻合大值都為 $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，此時颱風才開始往西南方偏移；2100 UTC 颱風南側輻合值達 $4.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，而中心東北側的輻合大值僅 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，颱風路徑逐漸往東南方 (圖 4-7c)；2200 UTC 颱風西南側輻合值減弱到 $2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，而東北側的輻合大值達 $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，颱風停止南移，並往東北方向移動 (圖 4-7d)。當颱風靠近台灣時，其中心西側低層氣流，部分爬山後形成往北流場，與近中心附近往南氣流交會於颱風西南側，誘發局部地區的輻合效應，似能導致颱風往輻合極大值區移動。4-3 節中將透過渦度收支分析討論此低層輻散場對於颱風打轉的貢獻。

4-3 打轉期間渦度收支變化

過去的研究（李和張，2003；Holland，1983；Chan，1984；Chan and Williams，1987；Fiorino and Elsberry，1989；Lin et al., 1999；Chan et al., 2002）指出，颱風會往最大相對渦度變率之區域移動，為了解模擬颱風往南偏向（積分43~46 hr，13日1900~2200 UTC）時，渦度平流、輻散項及剩餘項的貢獻，因此計算控制組模擬結果低層（ $\eta = 0.88 \sim 0.993$ ）之渦度收支，期望由此討論颱風打轉時期的渦度收支特徵。 η 座標之渦度方程，可表示如下（李，2009）：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla(\zeta + f) - \dot{\eta} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} - (\zeta + f) \nabla \cdot \vec{V} - \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} - \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} \right] + \frac{1}{\rho^2} \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\eta}{\pi} \frac{\partial \pi}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \eta} \right) - \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\eta}{\pi} \frac{\partial \pi}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \eta} \right) \right] + \text{residual}$$

$$\pi = P_{\text{sfc}} - P_{\text{top}}$$

上式中， $\dot{\eta}$ 代表追隨地勢座標下之垂直風場，等號左邊即為垂直方向渦度的局部變化率（Local Rate of Change），等號右邊依序為水平平流項（Horizontal Advection Term）、垂直平流項（Vertical Advection Term）、輻散（合）項（Divergence Term）或渦管拉伸項（Stretching Term）、扭轉項（Tilting Term）、力管項（Solenoidal Term）和剩餘項（Residual Term，此項包含熱力效應、摩擦或電腦計算誤差）。

圖4-8~圖4-11為模擬颱風往南偏向時之渦度收支變化，時間依序為13日1900、2000、2100和2200 UTC，其中「局部渦度變化」的等值線間距為 $5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ，而其它項為 $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 。結果顯示，模擬颱風的移動方向有往最大相對渦度變率之特徵，在其南偏打轉過程中，局部渦度正變率極大值區域隨時間氣旋式平移分布。因此，討論水平平流項、垂直平流項、輻散（合）項、扭轉項及剩餘項對於局部渦度變率的貢獻程度，其中剩餘項代表次網格作用和計算誤差，與積雲對流作用有密切關係。

颱風往南偏向期間的渦度收支分析顯示，13日1900 UTC 模擬颱風往西北方向移動，此時中心西北側有最大渦度正變率，數值達到 $12 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-8a)，剩餘項和輻散項對此渦度變率有正貢獻。2000 UTC 模擬颱風開始轉向並往西南方移動，此時最大渦度變率位於颱風西南側，極大值介於 $8.5 \times 10^{-7} \sim 12.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-9a)，輻散項和剩餘項對此渦度變率有正貢獻，極大值分別達到 $245 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-9d) 和 $170 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-9f)。2100 UTC 模擬颱風逐漸往東南方向移動，此時最大渦度變率區移往中心的東南側，達到 $15.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-10a)，輻散項和剩餘項對此渦度變率有正貢獻，極大值分別達到 $195 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-10d) 和 $55 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-10f)，水平平流項對此渦度變率則有負貢獻。2200 UTC 模擬颱風停止南偏並往東北方移動，最大渦度變率移往中心的東北側，極大值達到 $12.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-11a)，輻散項和剩餘項對此渦度變率有正貢獻，極大值各達到 $165 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-11d) 和 $15 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-11f)。以上渦度收支討論中，垂直平流項、扭轉項和力管項 (圖略) 數值很小可直接忽略。

分析顯示，輻散 (合) 項於此南偏移向期間對於局部渦度變率有正貢獻，範圍從颱風中心東北方往西南方延伸，最大值介於 $145 \times 10^{-7} \sim 245 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ ，代表氣流在此區域輻合效應顯著，造成潛熱釋放與增強氣流上升運動並引發負的垂直渦度平流產生，利於近地層的氣流持續輻合；而剩餘項對於局部渦度變率也有正貢獻，雖然貢獻程度比輻散 (合) 項小，但表示次網格效應在颱風南偏打轉過程中有其重要性，此與 4-1 節的討論相呼應。整體來看，輻散項對於提供渦度變率的正貢獻多於渦度平流項，使渦度平流項在此個案中較不重要，此可從辛樂克颱風進入台灣東部近海時，由於導引氣流不顯著呈現移速緩慢與滯留情況獲得驗證。

4-4 颱風路徑未打轉之對照組模擬實驗

本節進行一組模擬實驗，名稱為 TR-60 和 TR-80，討論僅改變植入虛擬渦旋

的 R_{\max} 分別為 60 和 80 km 後，對於模擬的路徑有何改變，兩者其餘的模擬實驗設定同 CTRL 實驗（CTRL 設定之最大風速半徑 R_{\max} 為 70 km，最大風速 80 ms^{-1} ， α 為 0.7）。模擬結果顯示 TR-60 在侵台期間未打轉，而 TR-80 和 CTRL 實驗皆有發生打轉，如圖 4-12 所示，TR-80 在 13 日 1900~2330 UTC 期間，於台灣東北部沿海 22.9°N 、 121.4°E 附近發生打轉，14 日 0000 UTC 登陸台灣。研究中將討論 TR-80 在「打轉前和往南偏移期間」，台灣東南部海域是否同 CTRL 實驗中皆有發生高溫大於 36°C ，和最低相對濕度介於 25~35 % 的情形。亦分析 TR-60 實驗（14 日 0200 UTC 登陸台灣），比較此未打轉渦旋在登陸前的「環境場溫濕度、風場演變和渦度收支」與 CTRL 實驗之差別，期望能更加合理解釋導致辛樂克颱風打轉的原因。

實驗 TR-60 和 TR-80 的颱風中心最低氣壓變化如圖 4-13 所示，其氣壓變化趨勢和 JMA 或 JTWC 的差別在於前兩者模擬結果在 13 日 1200 UTC 前緩慢增強，而後才逐漸減弱，但後兩者顯示從 12 日 0600 UTC 起，颱風已經開始逐漸減弱，此方面 CTRL 實驗掌握的很好。TR-60 在 13 日 1800 UTC~15 日 0000 UTC 和 JMA 的誤差在 5 hPa 以內，大致上氣壓數值大小與 CTRL 實驗相當接近，13 日 0600 UTC 之前氣壓值略高於 CTRL 實驗，而後氣壓值比 CTRL 實驗稍低；TR-80 模式模擬的中心氣壓值比 CTRL 實驗和 TR-60 低，因此與觀測的差距較小。

討論實驗 TR-60（未打轉）和 TR-80（打轉）近地層（ $\eta=0.993$ ）於台灣東南方海域之最高溫與最低相對濕度，並和 CTRL 實驗進行比較。圖 4-14 為 TR-60 颱風登陸前的環境場，圖中顯示颱風北方區域和 CMR 西側的濕度高達 95 % 以上，台灣東部和東部近海存在乾熱空氣，隨颱風逐漸接近台灣，乾熱空氣範圍（圖 4-14 紅虛線）鮮少接近颱風環流中心。13 日 2100 UTC（圖 4-14a） 23°N 、 121.3°E 附近（紫虛線範圍內）極小區域溫度達到 36°C ，相對濕度介於 35~40 %。2200 UTC（圖 4-14b）紫虛線範圍稍稍增大，溫度 36°C ，相對濕度達介於 30~40 %。2300 UTC（圖 4-14c）紫虛線範圍減小，溫度 36°C ，相對濕度介於 40~45 %。14 日 0000

~0200 UTC (圖 4-14d~f) 台灣東南部海域溫度皆低於 36 °C。先前提到 CTRL 實驗在「打轉前~往南偏移期間」(圖 4-3a~d) 台灣東南部海域近地層有介於 36~38 °C 的高溫，最低相對濕度介於 25~35 %，此高溫和低濕區域(圖 4-3a~d 紫虛線範圍)明顯大於 TR-60，而 TR-60 並未發生打轉。此處，為突顯 4-1 節提及之台灣東南部海面範圍廣大的乾熱區(圖 4-3a~d 紫虛線範圍)和颱風發生小範圍打轉的關係，亦分析另一模擬 TR-80 (打轉) 實驗，如圖 4-15 所示，颱風「打轉前~往南偏移期間」(圖 4-15a~c) 台灣東南部海域有介於 36~38 °C 的高溫，最低相對濕度介於 25~45 %，此高溫和低濕區域(圖 4-15a~c 紫虛線範圍)明顯大於 TR-60；當颱風停止南偏，逐漸往北移動時，台灣東南部海域溫度皆低於 36 °C。而於 TR-80 颱風打轉期間(圖 4-15c~f) 高溫(大於 30 °C)、低濕度(低於 65 %)的乾熱空氣甚能十分接近颱風中心(圖中紅虛線範圍)。結果顯示，颱風打轉前於台灣東南部海面上的乾熱區，當此區之高溫和低濕達一定程度與範圍後，似可導致颱風路徑的偏移或打轉。

實驗 TR-60 在 9 月 14 日 0200 UTC 登陸台灣東北角，圖 4-16 為其登陸前的低層風場變化，圖中顯示 13 日 1600~1800 UTC(圖 4-16a~b) 颱風強風速區(53 ms⁻¹ 以上) 由中心東側移到西北側，颱風往西北方向移動。2000 UTC (圖 4-16c) 颱風西側環流受到地形破壞，風速減弱到 42 ms⁻¹ 以下，東北側風速較強，達到 53 ms⁻¹ 以上，颱風往西北西方向移動。2100 UTC(圖 4-16d) 颱風強風速區移到中心北側，介於 48~53 ms⁻¹，風暴朝西北西方向移動。2200~2300 UTC (圖 4-16e~f) 颱風北側和東南側有風速大值，介於 42~45 ms⁻¹，颱風往西北方移動。14 日 0000~0200 UTC (圖 4-18g~i) 颱風北側風速較強，路徑往西北方轉北移動。以上討論顯示，颱風接近地形時誘發的北風噴流並不顯著且維持時間也很短(圖 4-16b)，渦旋維持西北走向移動並登陸台灣，模擬中並未發生同 CTRL 實驗在登陸時(13 日 2000 UTC)，颱風中心西北側風速增加並高於東側(圖 4-5e)，而導引颱風往西南方偏移的情形。低層($\eta = 0.88 \sim 0.993$) 之平均水平輻散場(圖 4-17) 顯示，登陸前 13

日 2100 UTC~14 日 0000 UTC 颱風南至南南西側有介於 $3.5 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的輻合極大值區，隨颱風接近台灣此極大值區逐漸靠近地形邊界；位於颱風東側的輻合極大值自 $2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (圖 4-17a) 增大到 $3.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (圖 4-17b~d)。CTRL 實驗在颱風開始往南偏向時，其南側輻合極大值明顯增加，且颱風中心東北側輻合值逐漸減小，當颱風停止南移，並往東北方向移動時，其南側輻合極大值較前 1 hr 遞減，東北側則為增加，但 TR-60 登陸前的輻合極大值並無明顯變化。之後使用渦度收支分析討論 TR-60 與 CTRL 實驗的差異。

實驗 TR-60 之模擬颱風登陸前的低層 ($\eta = 0.88 \sim 0.993$) 渦度收支分析顯示，13 日 2300 UTC 模擬颱風往西北方向移動，此時最大渦度變率區在中心的西北側，數值達到 $6 \times 10^{-7} \sim 6.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-18a)，輻散項 (圖 4-18d) 對此渦度變率有正貢獻。14 日 0000 UTC 模擬颱風往西北方移動，此時最大渦度變率分布在中心的北北西側 ($10.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$) (圖 4-19a)，水平平流項、輻散項和剩餘項對此渦度變率有正貢獻，極大值分別達到 $15 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-19b)、 $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-19d) 和 $15 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-19f)。0100 UTC 模擬颱風往西北方向移動，此時最大渦度變率區分布於中心西北側，並以反時針方向延伸到南南西側，極大值介於 $5.5 \times 10^{-7} \sim 7.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-20a)，水平平流項和剩餘項對此渦度變率有正貢獻，極大值分別達到 $55 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-20b) 和 $60 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-20f)。以上渦度收支討論中，垂直平流項、扭轉項和力管項 (圖略) 數值很小可直接忽略。

比較 CTRL 和 TR-60 模擬中，水平平流項、輻散項及剩餘項對於提供渦度變率的貢獻程度。在 CTRL 實驗之模擬颱風打轉期間，輻散 (合) 項和剩餘項對於局部渦度變率有正貢獻，其中剩餘項極大值為 $170 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 、 $55 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 和 $15 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-9f、圖 4-10f 和圖 4-11f)，表示氣流過山後所導致的次網格效應對於颱風的打轉現象有正貢獻。在 TR-60 中，模擬颱風以西北方向侵襲台灣，並未發生打轉，登陸前 (14 日 0000~0100 UTC) 水平平流項、輻散項和剩餘項對此局部最大渦度

變率有正貢獻，其中剩餘項貢獻之極大值為 $15 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ 和 $60 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$ (圖 4-19f 和圖 4-20f)，明顯少於 CTRL 中之剩餘項的貢獻。



第五章 討論與總結

本研究之目的在分析侵台期間發生打轉之颱風的特徵，並探討導致颱風打轉的物理機制。根據中央氣象局提供的颱風路徑資料顯示，在 1990~2009 年間侵台的颱風，發生打轉的個案有楊希(1990)、寶莉(1992)、海棠(2005)、泰利(2005)、柯羅莎(2007)、辛樂克(2008)及薔蜜(2008)等七個颱風，這些颱風皆以西北行方向侵襲北台灣地區。為幫助了解打轉颱風的重要特徵，亦選取與打轉颱風具相似路徑但並未打轉的颱風進行分析，在相同的二十年時段共選取了四個未打轉颱風，分別是葛拉絲(1994)、納坦(2004)、碧利斯(2006)及卡玫基(2008)。為探討導致颱風打轉的機制，本研究使用 WRF 模式 (V3.1.1) 模擬侵台時打轉的辛樂克颱風(2008)；最合理的模擬結果 (CTRL 實驗) 其植入渦旋的最大風速半徑為 70 km，故亦進行 TR-60 和 TR-80 兩個對照實驗，其植入虛擬渦旋的 R_{max} 分別為 60 和 80 km (其餘設定同 CTRL 實驗)，而模擬結果顯示 TR-60 在侵台期間未打轉，但 TR-80 則有打轉。因此本研究探討比較三個實驗的環境場溫濕度、風場及渦度收支，以幫助了解導致打轉的物理機制。

觀測資料顯示，侵台期間發生路徑打轉的颱風大都以西北行路徑侵襲北台灣，且此類型颱風共同特性為其生命期曾發展至強烈颱風和移動速度較慢。分析颱風打轉的位置顯示，當颱風登陸台灣的緯度較高時(如：辛樂克和柯羅莎)，打轉的位置傾向先貼著地形邊界往南偏移，隨後反鐘向打轉一圈；但若登陸的緯度較低時(如：海棠和寶莉)，打轉的位置約在 23.6°N 且距離地形 0.4°經度(約為花蓮東方外海 40 km 附近)。進一步使用東南部測站逐時溫度和相對濕度分析焚風現象，當觀測到相對濕度小於 45 % 時，本研究定義為強焚風事件。分析結果顯示，強颱風打轉個案在打轉開始前(泰利、柯羅莎、辛樂克和薔蜜)或打轉時(海棠)東南部地區花蓮、成功和台東測站有機會觀測到強或中焚風，輕颱風寶莉並無觀測到明顯的焚風，顯示其打轉發生與台灣東南部之熱力效應無關聯；而侵台期間未打轉的颱風於東南部各測站之焚風發生頻率與強度遠小於上述之打轉個案。焚風發生使局地產生加熱且氣壓降低，雖然此局部低壓不易繼續發展，但似有利颱風往此

方向偏移，辛樂克颱風於打轉前 14 hr，台東測站即開始觀測到強焚風，氣壓也小幅度下降 2.3 hPa，因此，颱風似受台灣東南部地區顯著增溫而往南移動，形成小範圍氣旋式打轉，此現象可由模擬結果之渦度收支分析中「剩餘項」對於局部最大渦度變率的貢獻程度獲得驗證。辛樂克和薔蜜颱風同為強颱，前者於登陸前減弱至中颱，但後者仍為強颱，而觀測資料顯示強度較弱的辛樂克颱風在東南部測站有顯著的焚風。推測可能原因，除了辛樂克颱風移速緩慢外，也和其侵襲台灣的路徑方向有關（辛樂克行經 23.6°N 後至登陸時的路徑大約呈西北方向；而薔蜜較傾向北北西走向）。

歸納上述分析結果顯示，於侵台期間發生打轉的颱風，其共同特徵包括（1）以西北行路徑侵台、（2）生命期曾發展至強烈颱風、（3）移動速度較慢和（4）登陸前於東部測站觀測到強或中焚風。其中，以西北行路徑侵台的颱風打轉與否，和行經 23.6°N 至登陸時的路徑走向有關，打轉與未打轉個案於此範圍中之走向分別呈「西北至西北西方向」與「北北西方向」。

數值模擬方面，本研究使用 WRF (V3.1.1) 模擬辛樂克颱風，其於 2008 年 9 月 13~15 日影響台灣，13 日 1750 UTC 登陸宜蘭縣蘭陽溪時，立即於蘇澳附近外海反鐘向打轉一圈，共歷時 6 hr，隨後通過台灣東北角進入北部海面。最佳控制組實驗 (CTRL) 模擬結果對於辛樂克之強度、結構、登陸點、打轉位置和轉圈大小皆有合理的掌握。模擬颱風打轉時之低層環流中心相較於高層，轉圈的範圍較大也較接近台灣地形，應與受較顯著之地形阻擋有關。降雨方面，模式的降水分布和觀測相似，皆有東南部及西南部沿岸降水較少的情形，且主要的降水從北部延伸到中部山區，模式在北部區域的累積雨量和觀測較接近，但在中部地區的雨量的則為低估。

模擬結果顯示，辛樂克颱風剛登陸時，受地形影響使低層強風速區由颱風中心東北方移到西北方，逐漸導引颱風往西南方向偏移，此可合理推測颱風未來之移向，和目前所處之風場特徵極為相關。颱風接近台灣時，其西側環流部分爬山後形成往北的流場，與近中心附近往南氣流交會於颱風西南側，使低層誘發局部

的輻合效應。低層之水平輻散場顯示，颱風開始往西南方偏移前，其南側的輻合極大值較前 1 hr 增加，而東至東北側的輻合值減弱，當颱風停止南移，並往東北方向移動時，其東北側的輻合極大值增強，而南側的輻合極大值減弱。透過低層渦度收支分析顯示，颱風開始往西南方偏移打轉時，輻散項及剩餘項對於提供渦度變率的正貢獻多於渦度平流項。

對照組模擬實驗顯示，改變植入渦旋的最大風速半徑 (R_{max})，會使渦旋侵台期間的路徑走向產生打轉與未打轉的差異，TR-60、CTRL 實驗和 TR-80 的 R_{max} 依序為 60、70 和 80 km，三者侵台路徑極為相似，但僅後兩者有打轉，此可合理推測當 R_{max} 較大，渦旋環流結構更早受到地形影響，使路徑偏向打轉；且 R_{max} 較大時，會有較強之越山後的下沉氣流，進而使台灣東南方海域近地層存在範圍廣大的乾熱區，此可從模擬實驗獲得證實。TR-60、CTRL 及 TR-80 實驗模擬之近地層溫度和相對溼度顯示，前者隨颱風逐漸接近台灣，達到 36°C 的熱空氣區域極小；後兩者在「打轉前~往南偏移期間」台灣東南部海域有達 $36\sim 38^{\circ}\text{C}$ 的高溫，最低相對濕度介於 $25\sim 40\%$ ，此高溫和低濕區域明顯大於 TR-60。上述結果顯示，颱風侵台期間於台灣東南部海面上的乾熱區之高溫與低濕度現象達一定程度與範圍後，似可導致颱風路徑的偏移或打轉。進一步分析 TR-60 與 CTRL 實驗的差異顯示，前者登陸時並未發生颱風中心西北側風速增加並高於東側的現象；且 TR-60 登陸前的輻合場極大值並無明顯變化。渦度收支分析顯示，登陸前 TR-60 模擬颱風之剩餘項極大值皆小於 CTRL，颱風因此未打轉。

打轉個案在過去二十年共發生了七次，且近年來發生頻率似有增加的趨勢，過去已有 Jian and Wu (2008) 和 Huang et al. (2010) 進行個案的分析與模擬，並提出通道效應在此類型個案的重要性。本研究整理過去二十年所有打轉個案，並以相似路徑之未打轉個案做對照組，試圖了解導致颱風發生打轉現象的物理機制。受限於過去觀測資料不多，且僅有一個模擬個案，尚無法完整解釋打轉的物理機制。未來可配合雷達資料的輔助，針對此類型個案做進一步的分析，並配合更多個案的數值模擬結果一併討論，期望能對颱風打轉之機制有更深入的了解。

參考文獻

- 王時鼎，1980：台灣近海颱風運動及強度預報法。行政院國科會計畫研究報告，**18**，1-100。
- 交通部中央氣象局，歷史颱風資料庫
(<http://photino.cwb.gov.tw/tyweb/tyfnweb/historical.htm>)。
- 李志昕，2009：西北向侵台颱風登陸前中心路徑打轉之模擬研究。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，共82頁。
- 李清勝與張龍耀，2003：妮蔻兒颱風 (Nichole,1998) 侵台前路徑變化之研究。大氣科學，**31**，285-306。
- 林雨我與徐晉淮，1988：侵襲臺灣颱風之降雨分佈研究，氣象學報，**34(3)**，196-215。
- 洪秀雄與胡仲英，1989：颱風引發焚風之初步研究。大氣科學，**17**，1-44。
- 郭文鑠與楊之遠，1982：颱風誘發焚風現象及其對農作物之影響，氣象學報，**28(34)**，1-12。
- 黃清勇與許依萍，1998：台灣地形對理想型颱風環流之影響。大氣科學，**26**，281-324。
- 謝信良、王時鼎、鄭明典與葉天降，1997：台灣地區颱風預報輔助系統建立之研究，第二階段：侵台颱風路徑、強度、風力預報之應用研究 (二)。中央氣象局氣象科技研究中心專題研究報告，**CWB85-1M-01**，382pp。
- 簡國基與李清勝，2002：楊希颱風 (楊希，1990) 侵台的數值模擬與分析。大氣科學，**30**，147-170。
- 葉天降、陳得松、蕭玲鳳與黃康寧，2005：海棠颱風行徑受台灣地形影響之探討。海峽兩岸災變天氣分析與預報研討會論文彙編，**94**，107-110。
- 葉天降、蕭玲鳳、陳得松與黃康寧，2007：台灣地形引致颱風路徑迴轉之探討。中央氣象局天氣分析與預報研討會論文彙編，**96**，58-62。
- Adem, J., 1956：A series solution for the barotropic vorticity equation and its application in the study of atmospheric vortices. *Tellus*, **8**, 364-372.
- Bender, M. A., R. E. Tuleya, and Y. Kurihara, 1987：A numerical study of the effect of

- island terrain on tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 130-155.
- Brand, S., and J. W. Blesloch, 1974 : Changes in the characteristics of typhoons crossing the island of Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 708-713.
- Chan, J. C.-L., 1984 : An observational study of the physical processes responsible for tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1036-1048.
- _____, and R. T. Williams, 1987 : Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion. Part I : Zero mean flow. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1257-1265.
- _____, and F. M. F. Ko, and Y. M. Lei, 2002 : Relationship between Potential Vorticity Tendency and Tropical Cyclone Motion. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1317-1336.
- Chang, S. W.-J., 1982 : The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1255-1270.
- Chen, T.-C., S.-Y. Wang, M.-C. Yen, A.-J. Clark, and J.-D. Tsay, 2010 : Sudden surface warming-drying events caused by typhoon passages across Taiwan. *Amer. Meteor. Soc.*, **49**, 234-252.
- DeMaria, M., 1985 : Tropical cyclone motion in a nondivergent barotropic model. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1199-1210.
- Dudhia, J., 1989 : Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale twodimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Fiorino, M. and R. L. Elsberry, 1989 : Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 975-990.
- Grell, G. A., and D. Devenyi, 2002 : A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1693.
- Holland, G. J., 1983 : Tropical cyclone motion : Environmental interaction plus a beta effect. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 328-342.
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996 : Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- Huang, C. Y. 1993 : Study of Three Dimensional Anelastic Non-hydrostatic Model (in

- Chinese) . *Research Report, National Science Council, R. O. C., Taipei, R. O. C.*
- Huang, Y.-H., C.-C. Wu, and Yuqing Wang, 2010 : The Influence of the Island Topography on Typhoon Track Deflection. (Submitted to *Mon. Wea. Rev.*, 2010)
- Jian, G.-J., C.-S. Lee, and G. T. J. Chen, 2006 : Numerical simulation of Typhoon Dot (1990) during TCM-90 : Typhoon Dot's discontinuous track across Taiwan. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **17**, 23-52.
- _____ and C. C. Wu, 2008 : A Numerical Study of the Track Deflection of Supertyphoon Haitang (2005) Prior to Its Landfall in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 598-615.
- Kuo, H.-C., R. T. Williams, Jen-Her Chen, and Yi-Liang Chen, 2001 : Topographic effects on barotropic vortex motion : no mean flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 1310-1327.
- Liao. S. Y., 1979 : Analysis of typhoon modification in Relation to Foehn wind over Taiwan. *The Bulletin of Institute of Geophysics, National Central University*, **18**, 106-122.
- Lin, Y.-L., J. Han, D. W. Hamilton, and C.-Y. Huang, 1999 : Orographic influences on a drifting cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 534-562.
- _____, S.-Y., Chen, C. M. Hill, and C.-Y., Huang, 2005 : Control parameters for the influence of a mesoscale mountain range on cyclone track continuity and deflection. *Amer. Meteor. Soc.*, **62**, 1849-1866.
- _____, N. C. Witcraft, and Y.-H. Kuo, 2006 : Dynamics of track deflection associated with the passage of tropical cyclones over a mesoscale mountain. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 3509-3538.
- McWilliams, J. C., and G. R. Flierl, 1979 : On the evolution of isolated, nonlinear vortices. *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 1183-1206.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997 : Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres : RRTM, a validated correlated-*k* model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16,663-16,682.
- Rogers, E., T. Black, B. Ferrier, Y. Lin, D. Parrish, and G. DiMego, Cited 2001 : Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System : Increase in

resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. NWS Technical Procedures Bulletin 488, NOAA/NWS, 2001.

Shieh, S.-L., S.-T. Wang, M.-D. Cheng, and T.-C. Yeh, 1996 : User's guide (1) for typhoon forecasting in the Taiwan area (in Chinese). Res. Rep. CWB84-1M-01, 356 pp.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005 : A description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech Notes-468+STR.

Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999 : Typhoons affecting Taiwan : Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 67-80.

_____, 2001 : Numerical simulation of Typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using GFDL hurricane model. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1533-1549.

_____, T.-H. Yen, Y.-H. Kuo, and W. Wang, 2002 : Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I : The topographic effect. *Wea. and Forecasting*, **17**, 1001-1015.

Yeh, T. C. and R. L. Elsberry, 1993a : Interaction of typhoon with the Taiwan orography. Part I : Upstream track deflection. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3193-3212.


附錄 A

11個個案生命史與陸上颱風警報期間之降雨特徵

為了便於討論颱風中心位置與台灣地區降雨分布的關係，以下討論將累積雨量的時間分成「登陸前」、「登陸期間」和「出海後」。「登陸前」的雨量乃累計自發布陸上颱風警報起至登陸；「登陸期間」為累計颱風自登陸後至出海前的雨量；「出海後」累計颱風出海後到解除陸上警報後24 hr之累積雨量（主要考慮颱風環流離開台灣後所引進的降水）。

一、侵台期間打轉之颱風

(1) 楊希（1990年8月）



楊希颱風在1990年8月14日1800 UTC於 18.5°N 、 136.2°E 海面形成輕度颱風，多數時間活動於旺盛季風槽內，駛流場不明顯，形成後路徑往西北方向移動並左右擺盪，速度時快時慢，18日1800 UTC~19日0600 UTC颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值960 hPa，七級暴風半徑達200 km。楊希於19日0230 UTC在基隆與宜蘭間登陸，登陸後在台灣北部新竹一帶打轉，約歷時10 hr，1500~1600 UTC在新竹附近出海。

楊希颱風登陸前的30 hr降水，分布在北部地區和阿里山區，尤以桃竹苗山區最為顯著，最大到達650 mm（圖A1a）；登陸期間之14 hr降水，以台中以北地區和嘉義、南投山區為主，累積降水最強中心在中部阿里山區附近，最大達到650 mm（圖A1b）；出海後之29 hr降水減緩，但台中、南投和嘉義的山區雨勢仍大，最多達550 mm（圖A1c）。楊希侵台期間（17日2000 UTC~20日2100 UTC）總雨量（圖A1d）顯示，嘉義、南投交界之山區最大累積雨量達到1500 mm。楊希登

陸後滯留北部較久，使災情加重，依時間及降水最大之位置，可分成兩個時期，一是登陸前迎風面東北部山區的降水；二是登陸後降水最強中心往西南部移，CWB 局屬測站於 8 月 16~21 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為阿里山 1194.0 mm、玉山 718.5 mm、日月潭 505.5 mm、鞍部 409.4 mm、台中 397.0 mm 和梧棲 385.0 mm。

(2) 寶莉 (1992 年 8 月)

寶莉颱風在 1992 年 8 月 27 日 0000 UTC 於琉球南方海面 20°N、128°E 形成輕度颱風，形成和發展都在西太平洋季風槽中，受到太平洋副熱帶高壓駛流場偏東風的影響，颱風及其附近雲系皆向西北西行進，30 日 0000 UTC 颱風發展至最盛時期中心最低氣壓值 975 hPa，七級暴風半徑 200 km。寶莉登陸前 15 hr 開始打轉，並在 30 日 0600 UTC 登陸花蓮立霧溪口，1200 UTC 在新竹北方新豐附近出海。寶莉颱風強度不強，結構亦不好，中心風速反而比外圍小，對此大而弱的颱風定位相當困難。

寶莉颱風登陸前的 71 hr，北部和桃竹苗山區有顯著降水，達到 700 mm 以上 (圖 A2a)；登陸期間之 6 hr，雨勢集中在西南部地區，以高雄沿岸和中南部局部山區達到 300 mm 為最多 (圖 A2b)；出海後之 38 hr，北部山區、中部阿里山和高屏山區降雨明顯，達到 700 mm 以上 (圖 A2c)。寶莉侵台期間 (8 月 27 日 0700 UTC ~9 月 1 日 0200 UTC) 總雨量顯示，累積雨量超過 1500 mm 的有台北、桃園山區和高屏山區 (圖 A2d)。寶莉颱風登陸前打轉，加長影響台灣的時間及出海後引進旺盛西南氣流，各地累積雨量都相當多，CWB 局屬測站於 8 月 28~31 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為阿里山 749.9 mm、竹子湖 642.8 mm、鞍部 551.7 mm、玉山 506.2 mm、蘭嶼 433.9 mm 和花蓮 331.0 mm。

(3) 海棠 (2005 年 7 月)

海棠颱風在 2005 年 7 月 12 日 0000 UTC 於關島北北東方海面 22.9°N 、 149.2°E 形成輕度颱風，形成後往西南方移動，再往西，而後往西北方向（圖 2-1c），移動路徑大致受太平洋高壓導引氣流影響，16 日 1800 UTC～17 日 0000 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 912 hPa，七級暴風半徑達 280 km。海棠接近花蓮地區時，移速變慢且中心於東部近海打轉一圈，約歷時 7 hr，18 日 0650 UTC 於宜蘭東澳登陸，1400 UTC 在苗栗後龍出海。海棠颱風結構扎實，暴風圈和外圍環流的對流雲系發展旺盛。

海棠颱風登陸前的 39 hr 各地有雨，台北、桃園山區、宜蘭地區和花蓮北部降水最顯著，累積雨量超過 700 mm（圖 A3a）；登陸期間之 8 hr，雨勢集中在中部和西南部地區，最大達到 700 mm（圖 A3b）；出海後之 53 hr，全台各地皆有雨勢，受颱風引進西南氣流影響，苗栗以南的中南部地區降雨明顯，尤以山區最為顯著，累積雨量超過 700 mm 的範圍廣大（圖 A3c）。海棠侵台期間（16 日 1500 UTC～20 日 1900 UTC）總雨量顯示，累積雨量超過 1500 mm 發生在宜蘭、台中山區、阿里山區和高屏山區（圖 A3d）。台灣地區 7 月 17～19 日的降雨主要是受海棠颱風環流影響，20～21 日颱風暴風圈已離開本島，但外圍環流仍引進強盛對流雲雨帶，CWB 局屬測站於 16～20 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為阿里山 1215.5 mm、玉山 1144.5 mm、大武 1001.6 mm、恆春 625.0 mm、台南 621.0 mm 和高雄 576.5 mm。

(4) 泰利 (2005 年 8 月)

泰利颱風在 2005 年 8 月 27 日 0000 UTC 於關島西北西方海面 14.1°N 、 142.3°E 形成輕度颱風，路徑受太平洋副熱帶高壓駛流場導引而向西北移動，30 日 0600～1800 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 920 hPa，七級暴風半徑達 250 km。泰利登陸前高低層環流明顯分離，高層中心於 31 日 1700 UTC 登陸花蓮縣立霧溪，而低層環流中心在接近花蓮近海呈現滯留打轉，並於 2330 UTC 在宜蘭、花蓮間登

陸後即受地形影響減弱消失，由台中西方近海之副低壓取代，隨後高層環流與此副低壓重新整合後朝西北西移動離開台灣。

泰利颱風登陸前的 35 hr，各地均有降雨，以北部、東北部山區及中南部山區雨量最為顯著，尤以迎風面宜蘭山區累積雨量超過 700 mm 為最多（圖 A4a）；登陸期間之 1 hr，西南部地區有雨勢，其中阿里山區累積雨量最大達到 80 mm（圖 A4b）；出海後之 41 hr，因泰利颱風的低層環流中心登陸後即減弱消失，由台中西方近海之副低壓取代，所以將登陸到出海後的降水合併至此時段，結果顯示彰化、雲林、嘉義沿岸和高雄、台東山區雨量顯著，其中山區累積雨量超過 700 mm（圖 A4c）。泰利侵台期間（8 月 30 日 1200 UTC~9 月 2 日 1600 UTC）總雨量顯示，累積雨量達到 1500 mm 發生在宜蘭和高雄、台東交界山區（圖 A4d）。台灣地區受泰利颱風影響，各地均有降雨，以北部、東北部山區及中南部山區雨量最為顯著，CWB 局屬測站於 8 月 30 日~9 月 1 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為阿里山 666.0 mm、玉山 443.6 mm、花蓮 406.5 mm、鞍部 395.0 mm、基隆 323.8 mm 和竹子湖 301.5 mm。

(5) 柯羅莎（2007 年 10 月）

柯羅莎颱風在 2007 年 10 月 2 日 0000 UTC 於菲律賓東方海面 17.1°N、131.0°E 形成輕度颱風，移動主要受副熱帶高壓強度變化控制，4 日 1200 UTC~6 日 0600 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 925 hPa，七級暴風半徑最大為 300 km。柯羅莎登陸前導引其移動的氣流微弱，受到地形與環流交互作用影響，在宜蘭至花蓮沿岸打轉近 8 hr，6 日 1430 UTC 於頭城及三貂角間登陸，1520 UTC 在基隆附近出海。柯羅莎颱風結構紮實、暴風範圍大。

柯羅莎颱風登陸前的 35 hr 各地有雨，尤其是台北、桃竹苗、嘉義、高雄山區和宜蘭地區雨勢最大，超過 700 mm（圖 A5a）；登陸期間之 2 hr，降水以阿里山區

和高屏山區為主，最多達到 80 mm (圖 A5b)；出海後之 45 hr，除東半部外各地有雨，尤其是苗栗、台中山區和高屏山區，雨量最大達到 700 mm (圖 A5c)。柯羅莎侵台期間 (4 日 2100 UTC~8 日 1300 UTC) 總雨量 (圖 A5d) 顯示，CMR 山麓地區雨勢最大，某些區域累積雨量達到 1500 mm。台灣地區受柯羅莎颱風影響，CWB 局屬測站於 10 月 5~7 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為阿里山 1093.0 mm、鞍部 561.5 mm、玉山 530.0 mm、竹子湖 512.0 mm、台中 280.4 mm 和日月潭 280.2 mm。

(6) 辛樂克 (2008 年 9 月)

辛樂克颱風在 2008 年 9 月 8 日 1800 UTC 於菲律賓東方海面 16.7°N、125.7°E 發展成輕度颱風，形成後往北北西方向移動，再轉北，進而轉向西北方向接近台灣(圖 2-1c)，移動路徑大致受太平洋副熱帶高壓影響，10 日 1200 UTC~11 日 1200 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 935 hPa，七級暴風半徑達 250 km。辛樂克進入台灣東部近海時處於鞍型場中，呈現滯留現象，13 日 1750 UTC 於宜蘭縣蘭陽溪登陸後，強度減弱並向南偏移呈打轉，打轉過程中於蘇澳出海，共歷時 6 hr 打轉，並在 14 日 0200 UTC 左右通過台灣東北角進入北部海面，滯留 6 hr 重新整合後往東北方移動。辛樂克颱風結構紮實，豪雨重創中部地區，尤以南投縣仁愛鄉廬山溫泉區的土石流災情最嚴重。

辛樂克颱風登陸前的 44 hr，降雨從台北、桃竹苗和宜蘭的山區逐漸擴展到整個台中以北的區域，花蓮北部和嘉義阿里山區也有明顯累積雨量，而以迎風面之宜蘭和桃竹山區累積雨量超過 700 mm 最為顯著 (圖 A6a)；登陸期間之 4 hr，雨勢從宜蘭、台北交界處和阿里山區往四周延伸到西部沿海，較大降雨出現在宜蘭、台北交界處，最大達到 250 mm (圖 A6b)；出海後之 64 hr，全台幾乎都有顯著降水，其中苗栗、台中山區、南投和嘉義、高屏山區均有超過 700 mm 的雨量 (圖 A6c)。辛樂克侵台期間 (11 日 2100 UTC~16 日 1300 UTC) 總雨量 (圖 A6d) 顯

示，CMR 山麓地區雨勢最大，其中某些區域累積雨量超過 1500 mm。台灣地區受辛樂克颱風影響，CWB 局屬測站於 9 月 12~15 日總累積雨量顯示，主要降水發生於北部及中部山區，前 6 大排名依序為阿里山 1457.7 mm、鞍部 1062.5 mm、竹子湖 1037.5 mm、玉山 881.5 mm、日月潭 854.1 mm 和彭佳嶼 731.5 mm。

(7) 薔蜜 (2008 年 9 月)

薔蜜颱風在 2008 年 9 月 24 日 1200 UTC 於關島西方海面 14.6°N、132.5°E 形成輕度颱風後，往西北方向移動，27 日 0000 UTC~28 日 0500 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 925 hPa，七級暴風半徑僅 280 km。28 日 0740 UTC 於宜蘭縣南澳登陸，2020 UTC 在桃園附近出海。此颱風為台灣帶來強風豪雨，蘇澳出現 17 級以上陣風，宜蘭和蘭嶼 15 級。

薔蜜颱風登陸前的 31 hr，雨勢從宜蘭和台北、桃園山區逐漸延伸到花蓮，再繼續往台灣西南部擴展，除中南部沿岸外，各地有雨，以宜蘭山區雨勢較多，累積雨量超過 700 mm (圖 A7a)；登陸期間之 14 hr，全台各地幾乎都有降水，雨勢主要集中在宜蘭山區、南投地區、嘉義阿里山附近和高屏山區，其中阿里山和高屏山區雨勢最大，達到 700 mm (圖 A7b)；出海後之 37 hr，除東半部外，全台幾乎都有顯著降水，尤以台中、南投交界雨勢最多，達到 450 mm (圖 A7c)。薔蜜侵台期間 (27 日 0000 UTC~30 日 1000 UTC) 總雨量 (圖 A7d) 顯示，全台皆有雨勢，以宜蘭山區最多，超過 1500 mm。薔蜜颱風登陸後在台灣陸地上方往南偏折打轉，再繼續朝西北方向移動，以致在台灣停留的時間將近 13 hr，CWB 局屬測站於 9 月 27~29 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為阿里山 812.0 mm、竹子湖 587.0 mm、鞍部 490.5 mm、玉山 439.1 mm、日月潭 391.5 mm 和蘭嶼 276.5 mm。

二、侵台期間未打轉之颱風

(1) 葛拉絲 (1994 年 8 月)

葛拉絲颱風在 1994 年 8 月 24 日 0600 UTC 於硫磺島東方海面 23.9°N、156°E 形成輕度颱風，自形成到 25 日 0600 UTC 間處於駛流不明顯的鞍形場中，導致移動速度緩慢，移動路徑大致受太平洋高壓位置、強度及高壓脊方向所主宰，31 日 1200 UTC~9 月 1 日 0000 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 965 hPa，七級暴風半徑 200 km。葛拉絲登陸前（9 月 1 日 0000~0250 UTC）有明顯的加速現象，主要原因是太平洋副熱帶高壓位於日本及東海，高壓中心自地面到高層均沒有明顯改變，因此各層導引氣流風向一致且速度較大，使颱風移速變快。葛拉絲颱風在 9 月 1 日 0250 UTC 於蘇澳附近登陸，0640 UTC 於新竹附近出海，環流小但紮實，中心氣壓和平均最大風速的變化呈現雙波谷及雙波峰曲線（圖略），其低層風場以路徑之右側較強。

葛拉絲颱風登陸前的 24 hr，北部地區有雨，最高達到 250 mm（圖 A8a）；登陸期間之 5 hr，以北部和中部地區降雨明顯，最高達到 250 mm（圖 A8b）；出海後之 36 hr，雨勢漸緩，降雨主要發生在中部地區的苗栗、台中、彰化和雲林，大約介於 10~80 mm（圖 A8c）。葛拉絲侵台期間（8 月 31 日 0200 UTC~9 月 2 日 1900 UTC）總雨量（圖 A8d）顯示，嘉義以北地區有雨，累積雨量在台北地區最多達到 400 mm，CWB 局屬測站於 8 月 31 日~9 月 2 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為嘉義 211.0 mm、宜蘭 199.0 mm、竹子湖 195.0 mm、鞍部 168.8 mm、蘇澳 139.4 mm 和基隆 130.6 mm。

（2）納坦（2004 年 10 月）

納坦颱風在 2004 年 10 月 16 日 1200 UTC 於關島東南東方 10.9°N、155.3°E 形成輕度颱風，此時處於太平洋高壓南緣，沿駛流方向移動，23 日 0000 UTC~24 日 1200 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 945 hPa，七級暴風半徑最大達 250 km。納坦於 25 日 0230 UTC 在頭城至三貂角間登陸，0515 UTC 於淡水至富貴角間出海，其結構良好，登陸後受地形破壞強度減弱，暴風圈縮小。

納坦颱風登陸前的 29 hr，北部地區和花蓮有雨勢，以東北部迎風面雨量最多，最高達到 600 mm (圖 A9a)；登陸期間之 4 hr，降水並不顯著，僅北海岸、桃竹苗和南投地區有零星雨量，約 10~80 mm (圖 A9b)；出海後之 34 hr，降雨仍以北部地區為主，其中山區雨量達到 300 mm 為最多 (圖 A9c)。納坦侵台期間 (23 日 2100 UTC~26 日 1600 UTC) 總雨量 (圖 A9d) 顯示，台中以北和花蓮地區有雨，累積雨量在宜蘭地區最多，達到 700 mm。台灣地區受納坦颱風的雨帶和東北季風共伴影響，苗栗以北、宜蘭及花蓮地區雨量豐沛，CWB 局屬測站於 10 月 24~25 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為鞍部 496.5 mm、竹子湖 371.5 mm、基隆 317.7 mm、彭佳嶼 187.7 mm、宜蘭 180.5 mm 和淡水 172.5 mm。

(3) 碧利斯 (2006 年 7 月)

碧利斯颱風在 2006 年 7 月 9 日 0600 UTC 於關島西方海面 13.4°N、137.0°E 形成輕度颱風，路徑受日本南方海面太平洋副熱帶高壓影響，往西北方向移動，13 日 0600 UTC~14 日 0000 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 978 hPa，七級暴風半徑最大達 300 km。碧利斯在 13 日 1420 UTC 於宜蘭頭城登陸，1720 UTC 在淡水出海，其中心結構鬆散，定位困難，西南及東南象限對流雲系較強且範圍廣。

碧利斯颱風登陸前的 38 hr，北部和中南部地區有雨，尤以迎風面宜蘭地區累積雨量到達 650 mm 為最多 (圖 A10a)；登陸期間之 4 hr，苗栗以南的西半部地區有雨，雨勢仍以山區較多，最大達到 200 mm (圖 A10b)；出海後之 49 hr，各地均有降水，受颱風引進西南氣流影響，嘉義和高屏山區降水最明顯，超過 700 mm (圖 A10c)。碧利斯侵台期間 (12 日 0000 UTC~15 日 1900 UTC) 總雨量 (圖 A10d) 顯示，全台皆有雨勢，尤以嘉義和高屏山區達到 1200 mm 為最多。台灣地區受碧利斯颱風影響，降水以中南部最為顯著，CWB 局屬測站於 7 月 12~15 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為阿里山 611.0 mm、玉山 508.0 mm、高雄 352.0 mm、鞍

部 329.5 mm、竹子湖 303.0 mm 和日月潭 252.0 mm。

(4) 卡玫基 (2008 年 7 月)

卡玫基颱風在 2008 年 7 月 15 日 1200 UTC 於菲律賓東北方海面 18.1°N、123.7°E 形成輕度颱風，形成後導引氣流不明顯，17 日 0900~1200 UTC 颱風發展至最強盛時期中心最低氣壓值 970 hPa，七級暴風半徑僅 120 km。卡玫基在 17 日 1340 UTC 於宜蘭縣南部登陸，2320 UTC 在桃園附近出海，其結構鬆散，風力並不強。

卡玫基颱風登陸前的 19 hr，東北部宜蘭和西南部地區有雨，最大累積雨量達到 500 mm (圖 A11a)；登陸期間之 11 hr，除台北外各地皆有雨，尤其是台中、南投地區和嘉義、高雄山區有顯著雨勢，最大達到 650 mm (圖 A11b)；出海後之 37 hr，除東半部外各地有雨，以台中和屏東山區雨勢較多，達到 450 mm (圖 A11c)。卡玫基侵台期間 (16 日 1800 UTC~19 日 1300 UTC) 總雨量 (圖 A11d) 顯示，全台皆有雨，尤以嘉義、台南、高屏山區達到 1000 mm 為最多。卡玫基颱風本身降雨較少，但受外圍環流與引進西南氣流影響，台灣中部和西南部地區短時間降下超大豪雨，造成多處低窪地淹水，山區多處落石坍方，CWB 局屬測站於 7 月 17~18 日的總累積雨量，前 6 大排名依序為阿里山 613.5 mm、日月潭 555.0 mm、台中 497.4 mm、玉山 436.6 mm、澎湖 431.0 mm 和高雄 346.5 mm。

綜合以上，颱風登陸前的降雨分布方面，打轉之颱風，於全台各地皆有累積降雨，尤其以北部的桃竹苗山區、宜蘭地區和中部阿里山地區降雨最顯著；而未打轉之颱風在全台的雨量分布集中在北部地區，台中以南地區有的個案無降水 (如：葛拉絲和納坦)，而中南部雨勢最顯著的個案是卡玫基；若比較此期間的總累積雨量，明顯少於打轉之颱風。所有個案登陸期間和出海後之降水分布，皆以西半部為主，而雨量多寡受颱風移速快慢主導。

附錄 B

對照組TR-60和TR-80登陸前之雷達回波圖

(1) TR-60

圖 B1 為對照組 TR-60 模擬登陸前之雷達回波圖，模擬的對流範圍雖比觀測(圖 3-15 左)稍小，但同樣在迎風面東北部和中央山脈山區有較大的回波值，最大值達 55 dBZ。

(2) TR-80

圖 B2 為對照組 TR-80 模擬登陸前之雷達回波圖，模擬的對流範圍與觀測(圖 3-15 左)相似，且同樣在迎風面東北部和中央山脈山區有較大的回波值，最大值達 55 dBZ，但模擬於台灣西部外海達 55 dBZ 的回波值範圍大於觀測。



表 2-1 西北行走向侵台颱風簡要資訊，陰影表打轉颱風。(資料來源：CWB)

颱風編號 與 颱風名稱	年	強度	陸上警 報時間 (UTC)	登陸地點	登陸時間 (UTC)	侵台 期間 打轉	東南部測站 焚風發生比
9012 楊希 (Yancy)	1990	中 度	08172040 ~ 08192015	基隆與宜 蘭間	08190230	✓	4/4
9216 寶莉 (Polly)	1992	輕 度	08270730 ~ 08310140	花蓮立霧 溪口	08300600	✓	0
9416 葛拉絲 (Gladys)	1994	中 度	08310215 ~ 09011830	蘇澳	09010250	-	3/4
0424 納坦 (Nockten)	2004	中 度	10232130 ~ 10251530	頭城至三 貂角間	10250230	-	2/4
0505 海棠 (Haitang)	2005	強 烈	07161530 ~ 07191830	宜蘭東澳	07180650	✓	4/4
0513 泰利 (Talim)	2005	強 烈	08301230 ~ 09011530	高層(花 蓮立霧 溪)；低 層(宜 蘭、花 蓮 間)	高層 (083117 00)；低 層 (083123 30)	✓	4/4
0604 碧利斯 (Bilis)	2006	輕 度	07120030 ~ 07141830	宜蘭頭城	07131420	-	2/4
0715 柯羅莎 (Krosa)	2007	強 烈	10042130 ~ 10071230	頭城及三 貂角間	10061430	✓	4/4
0807 卡玫基 (Kalmaegi)	2008	中 度	07161830 ~ 07181230	宜蘭縣南 部	07171340	-	0
0813 辛樂克 (Sinlaku)	2008	強 烈	09112130 ~ 09151230	宜蘭蘭陽 溪	09131750	✓	4/4
0815 薔蜜 (Jangmi)	2008	強 烈	09270030 ~ 09290930	宜蘭南澳	09280740	✓	2/4

表 2-2 焚風等級分類。(資料來源：CWB)

最高溫度 (T_{\max})	°C	28~ 29.9	30~ 31.9	32~ 33.9	34~ 35.9	36~ 37.9	≥ 38			
	代號	1	2	3	4	5	6			
最大溫度 露點差 ($T-T_d$) _{max}	°C	4~ 5.9	6~ 7.9	8~ 9.9	10~ 11.9	12~ 13.9	14~ 15.9	16~ 17.9	18~ 19.9	≥ 20
	代號	a	b	c	d	e	f	G	h	i

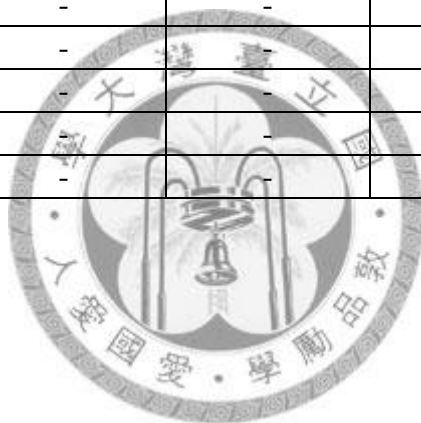
表 2-3 颱風侵台期間之綜觀場特徵，陰影表打轉颱風。

綜觀場特徵 \ 颱風名稱	楊希	寶莉	海棠	泰利	柯羅莎	辛樂克	薔蜜	葛拉絲	納坦	碧利斯	卡玫基
駛流場較弱、不顯著	✓				✓	✓					✓
駛流場較顯著，導引颱風往西北方向移動接近台灣		✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	
台灣北方有中緯度槽線通過，範圍到達 35°N 附近	✓			✓	✓	✓	✓			✓	✓
太平洋副熱帶高壓持續發展，5880 gpm 等值線持續往西伸展				✓		✓	✓		✓	✓	✓
太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 無發展、減弱或分裂	✓	✓	✓		✓			✓			
受到另一颱風影響，使太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線一分為二，高壓勢力減弱	✓	✓									
太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線位於 28~35°N、95~130°E 之間(呈東北東-西南西方向或東-西方向)		✓	✓	✓	✓		✓			✓	

表 2-4 颱風侵台期間東南部測站發生焚風時之觀測資料整理，陰影表打轉颱風。

颱風名稱	觀測資料	花蓮站	成功站	台東站	大武站
楊希	開始時間	打轉前 25 hr	打轉後 3 hr 打轉後 10 hr	打轉前 25 hr 打轉前 3 hr	打轉前 5 hr
	維持時數(hr)	2	2/1	4/7	6
	T _{max} (°C)	33.4	32.9/30.8	33.4/ 37.6	33.6
	RH _{min} (%)	56	58/63	56/37	62
	強度	弱	弱/弱	弱/強	弱
寶莉	開始時間	-	-	-	-
	維持時數(hr)	-	-	-	-
	T _{max} (°C)	-	-	-	-
	RH _{min} (%)	-	-	-	-
	強度	-	-	-	-
海棠	開始時間	打轉前 9 hr	打轉前 8 hr 打轉後 3 hr	打轉後 2 hr	打轉前 0 hr
	維持時數(hr)	3	3/4	6	6
	T _{max} (°C)	30.2	30.5/ 37.6	36.9	32.1
	RH _{min} (%)	59	62/ 39	35	58
	強度	弱	弱/強	強	弱
泰利	開始時間	打轉前 17 hr 打轉前 9 hr	打轉前 2 hr	打轉前 16 hr 打轉前 11 hr 打轉前 4 hr	打轉前 12 hr 打轉前 8 hr
	維持時數(hr)	6/2	4	2/3/6	2/7
	T _{max} (°C)	34.2/30.1	36.4	32.2/31.5/ 35.7	32.3/32.6
	RH _{min} (%)	46/58	43	59/60/ 41	60/56
	強度	中/弱	強	弱/弱/強	弱/弱
柯羅莎	開始時間	打轉前 0 hr	打轉前 2 hr	打轉前 4 hr	打轉前 8 hr
	維持時數(hr)	3	7	13	10
	T _{max} (°C)	36.1	37	36.5	31.3
	RH _{min} (%)	38	33	35	59
	強度	強	強	強	弱
辛樂克	開始時間	打轉前 1 hr	打轉前 2 hr	打轉前 14 hr	打轉前 19 hr
	維持時數(hr)	6	8	17	18
	T _{max} (°C)	32.5	32.7	37	32
	RH _{min} (%)	51	56	38	56
	強度	中	弱	強	弱
薔蜜	開始時間	-	打轉前 0 hr	打轉前 2 hr	-
	維持時數(hr)	-	4	6	-
	T _{max} (°C)	-	33.4	33.4	-
	RH _{min} (%)	-	51	47	-
	強度	-	中	中	-

葛拉絲	開始時間	-	登陸前 5 hr	登陸前 2 hr	登陸前 8 hr
	維持時數(hr)	-	6	4	14
	T _{max} (°C)	-	30.4	30.9	32.9
	RH _{min} (%)	-	61	54	49
	強度	-	弱	中	中
納坦	開始時間	-	-	登陸前 3 hr	登陸前 11 hr 登陸前 3 hr
	維持時數(hr)	-	-	4	6/7
	T _{max} (°C)	-	-	31.1	30.3/32.1
	RH _{min} (%)	-	-	62	45/54
	強度	-	-	弱	中/中
碧利斯	開始時間	登陸前 15 hr	-	-	登陸前 7 hr
	維持時數(hr)	2	-	-	2
	T _{max} (°C)	31.6	-	-	31.8
	RH _{min} (%)	62	-	-	63
	強度	弱	-	-	弱
卡孜基	開始時間	-	-	-	-
	維持時數(hr)	-	-	-	-
	T _{max} (°C)	-	-	-	-
	RH _{min} (%)	-	-	-	-
	強度	-	-	-	-



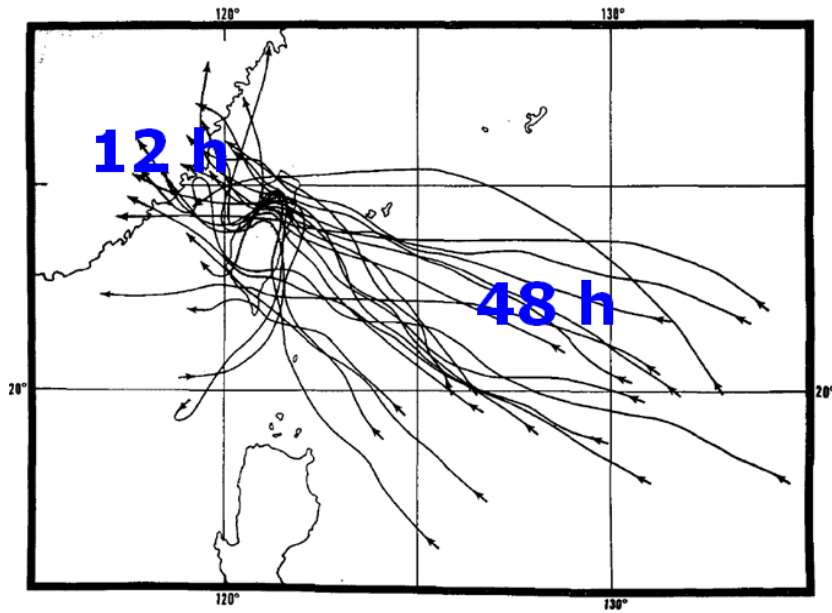


圖 1-1 1960~1972 年間，22 個西行侵台颱風於登陸前 48 hr 至出海後 12 hr 路徑圖。(Brand and Brelloch, 1974)

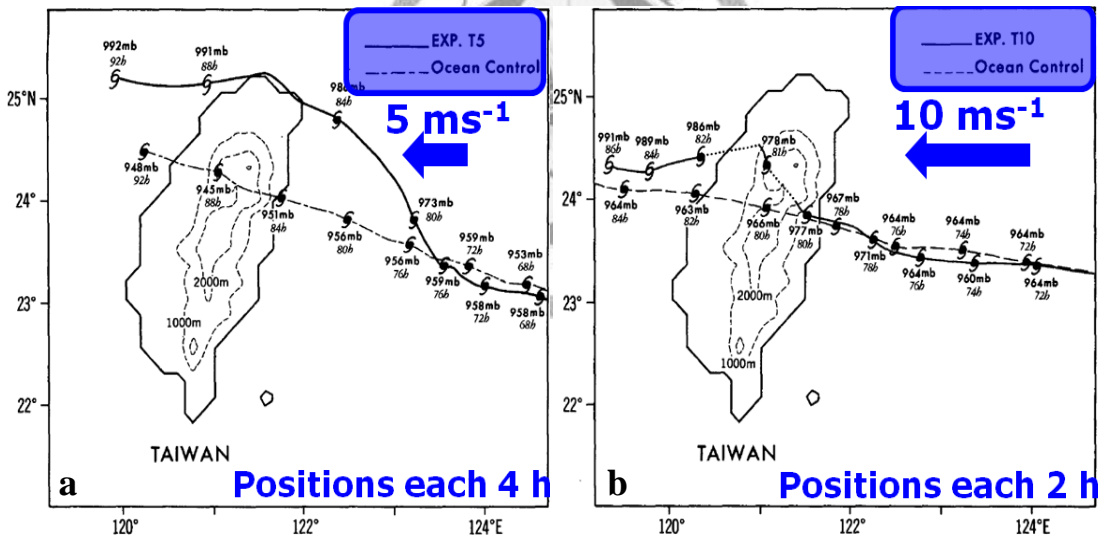


圖 1-2 風暴侵台路徑圖 (實線為實驗組，乃考慮台灣地形存在時的情況；虛線為僅考慮海洋表面時之控制組) (a) 背景東風流場 5 ms^{-1} (每 4 hr 定位環流中心)、(b) 背景東風流場 10 ms^{-1} (每 2 hr 定位環流中心)。(Bender et al., 1987)

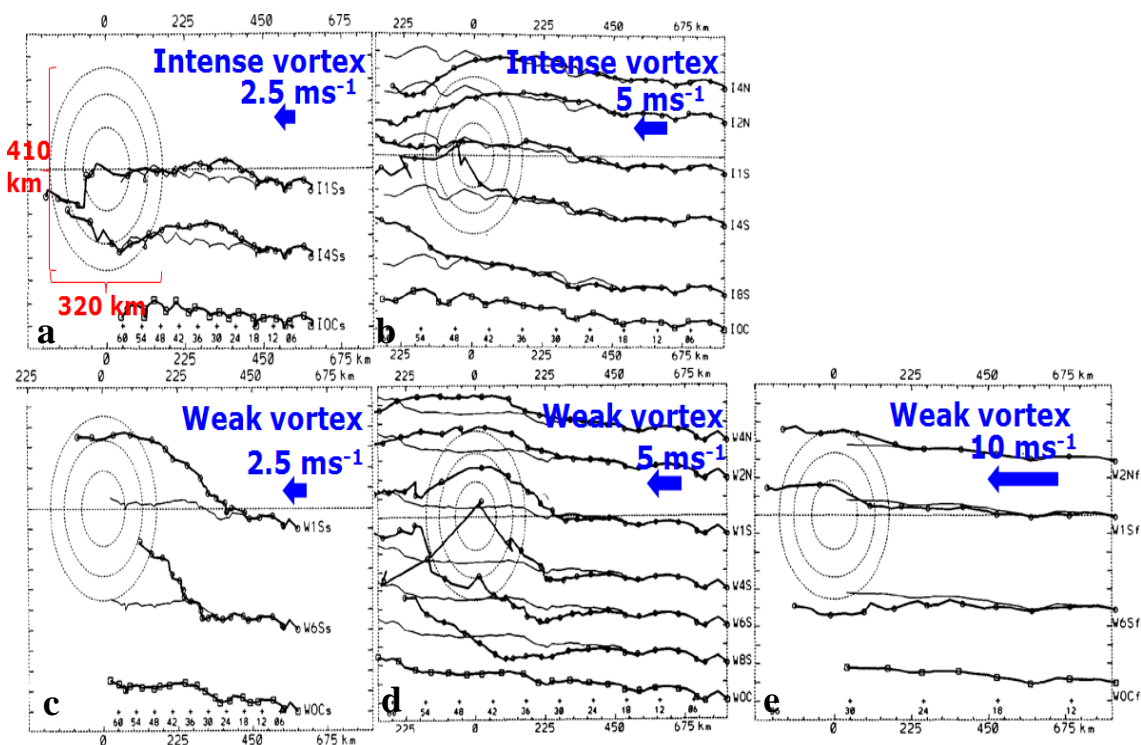


圖 1-3 西行移動接近理想台灣地形的熱帶氣旋路徑圖，強(弱)渦旋 P_{\min} 為 985 hPa (1001 hPa)、 V_{\max} 為 33 ms^{-1} (19 ms^{-1}) 和 R_{\max} 皆為 135 km (後兩項為在 900 hPa 的情況) (a) 強渦旋於背景東風流場 2.5 ms^{-1} 、(b) 強渦旋於背景東風流場 5 ms^{-1} 、(c) 弱渦旋於背景東風流場 2.5 ms^{-1} 、(d) 弱渦旋於背景東風流場 5 ms^{-1} 、(e) 弱渦旋於背景東風流場 10 ms^{-1} 。(Yeh and Elsberry, 1993a)

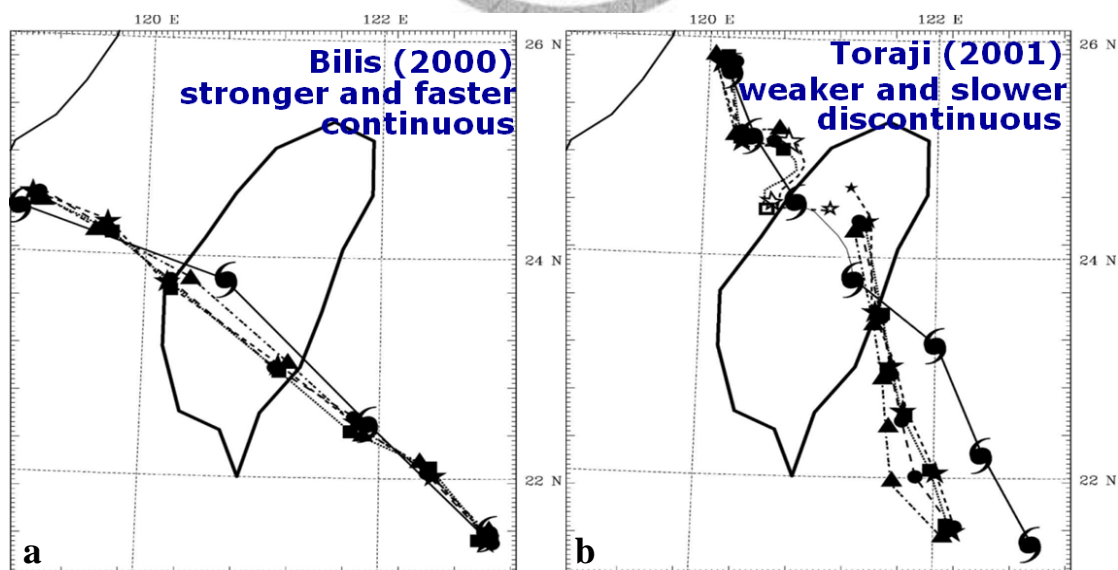


圖 1-4 觀測和模擬颱風路徑圖 (a) 碧利斯 (2000)、(b) 桃芝 (2001)。颱風標識為觀測颱風每 6 hr 定位，星形、正方形、圓形和三角形標識依序為表面、700、500 and 300 hPa 層之模擬颱風每 3 hr 定位。(Lin et al., 2006)

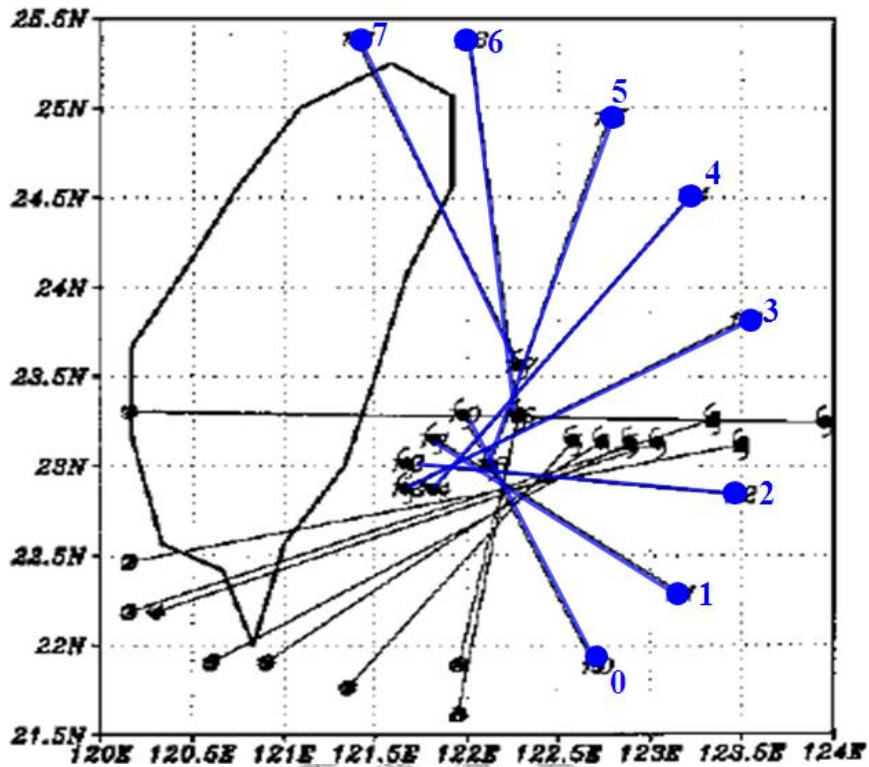


圖 1-5 模擬海棠（2005）颱風於台灣東部近海逐時中心（颱風標識）與擾動場渦旋中心（藍色圓點）之位置。（葉等，2005）

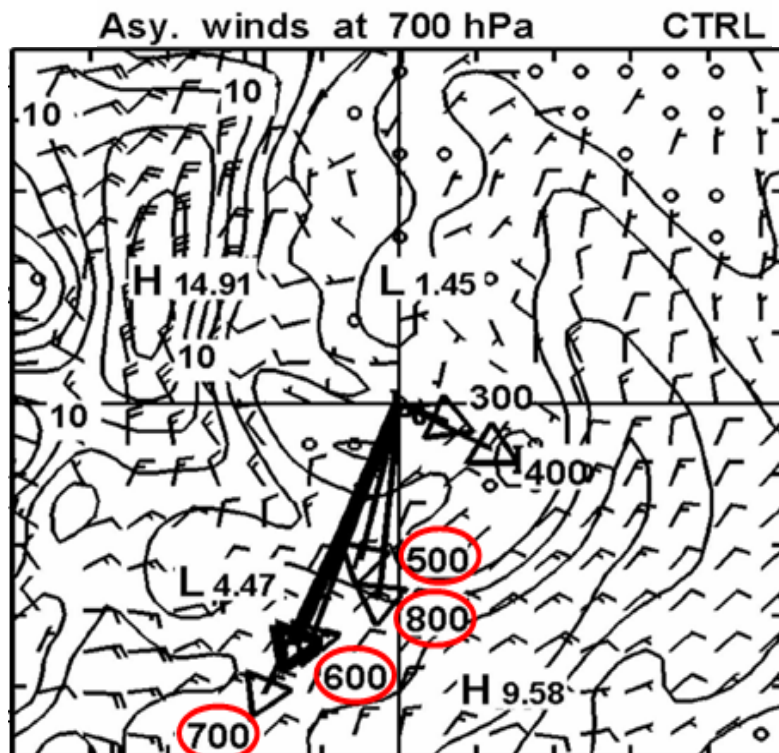


圖 1-6 模式積分 33 hr 海棠（2005）颱風 700 hPa 非對稱風場，粗箭頭為颱風移動方向，細箭頭為不同氣壓層之非對稱水平風向量。（full wind barb 代表 5 ms^{-1} ）（Jian and Wu, 2008）

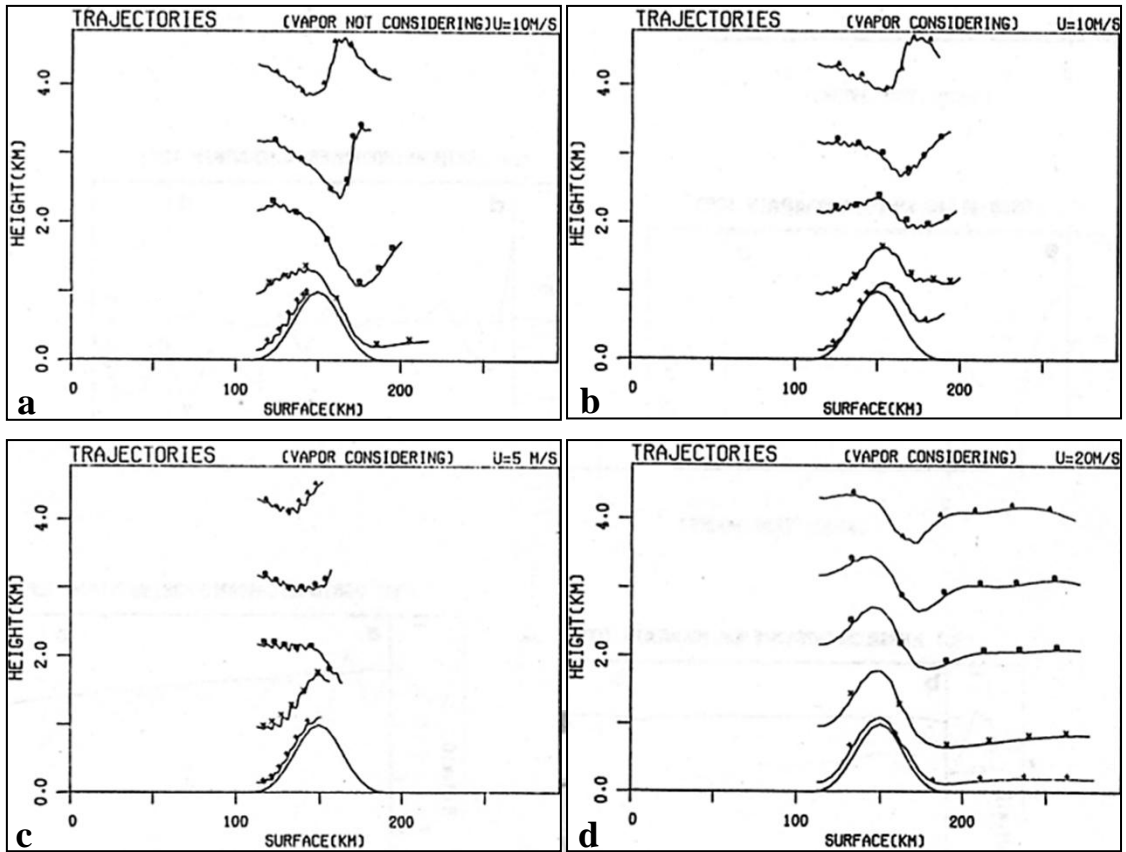


圖 1-7 空氣塊軌跡 (a) 乾流場中， $u=10 \text{ ms}^{-1}$ 、(b) 考慮水氣時， $u=10 \text{ ms}^{-1}$ 、(c) 考慮水氣時， $u=5 \text{ ms}^{-1}$ 、(d) 考慮水氣時， $u=20 \text{ ms}^{-1}$ 。(洪與胡，1989)

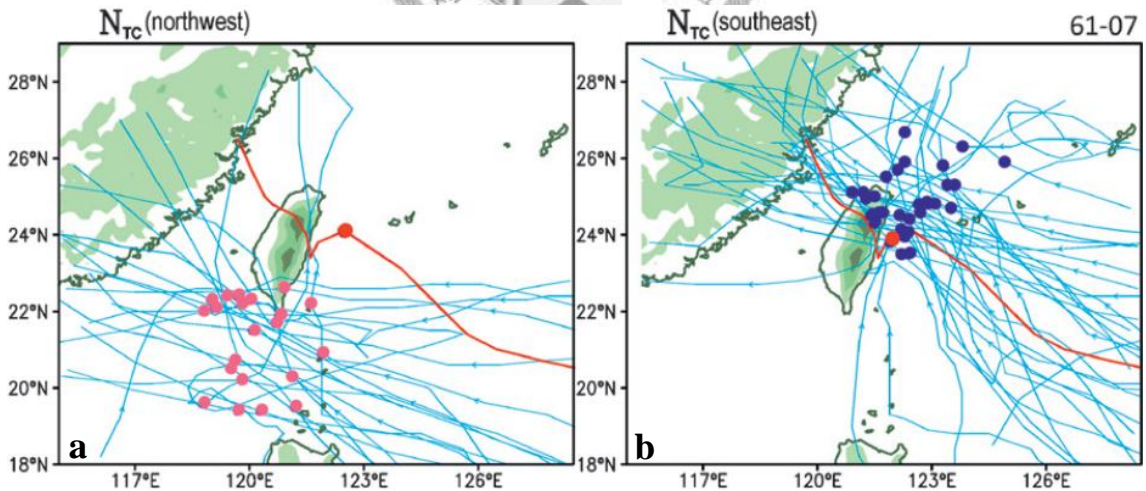


圖 1-8 1961~2007 年颱風季期間 54 個增溫事件的颱風路徑圖，其中紅色線為海棠 (2005) 颱風之路徑，圓點代表焚風發生時的颱風中心位置 (a) 西北部測站發生焚風之 23 個颱風路徑、(b) 東南部測站發生焚風之 31 個颱風路徑。(Chen et al., 2010)

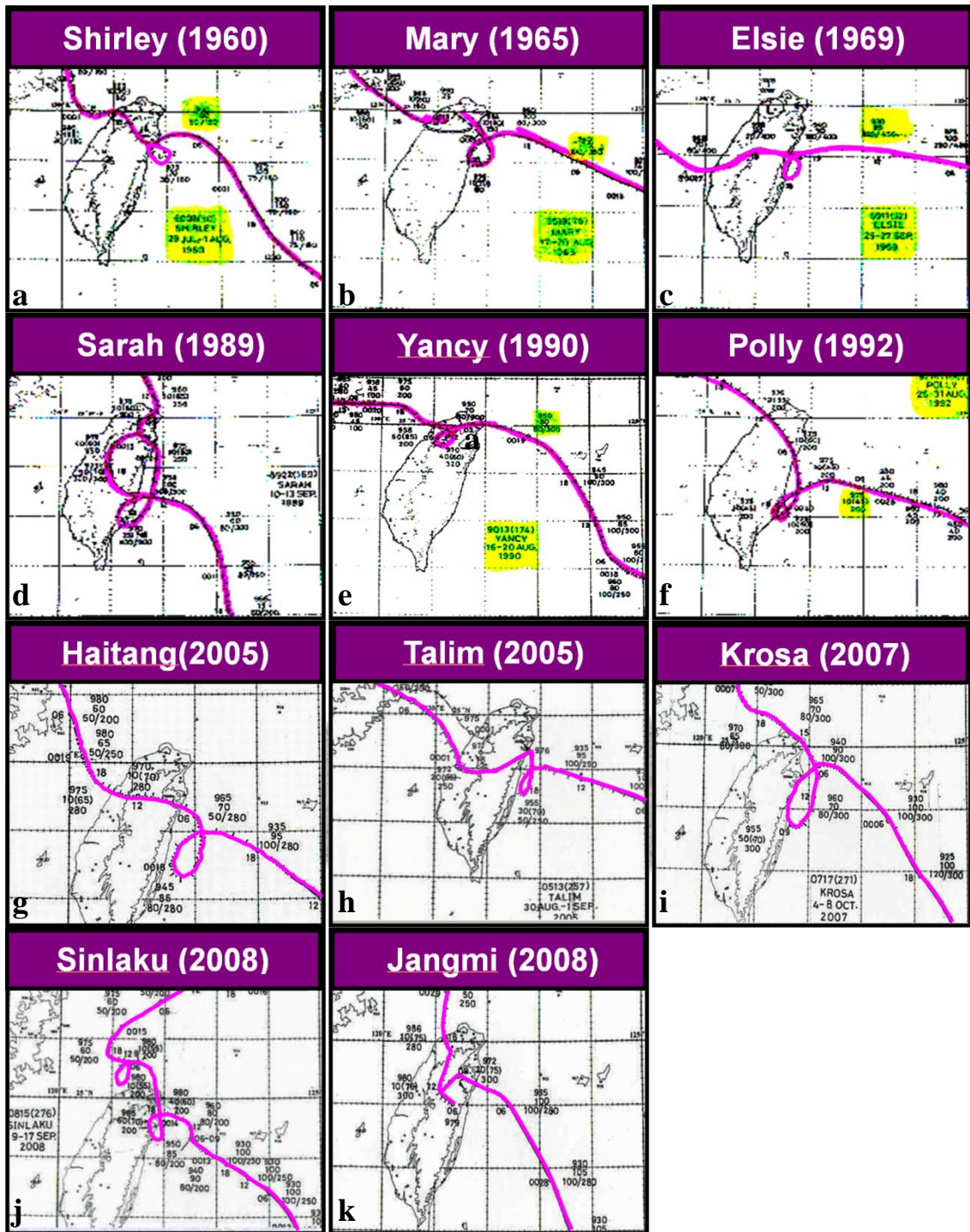


圖 1-9 歷史上颱風侵台期間發生打轉的個案 (a) 雪莉 (Shirley, 1960)、(b) 瑪麗 (Mary, 1965)、(c) 艾爾西 (Elsie, 1969)、(d) 莎拉 (Sarah, 1989)、(e) 楊希 (Yancy, 1990)、(f) 寶莉 (Polly, 1992)、(g) 海棠 (Haitang, 2005)、(h) 泰利 (Talim, 2005)、(i) 柯羅莎 (Krosa, 2007)、(j) 辛樂克 (Sinlaku, 2008)、(k) 薔蜜 (Jangmi, 2008)。(CWB 歷史颱風資料庫)

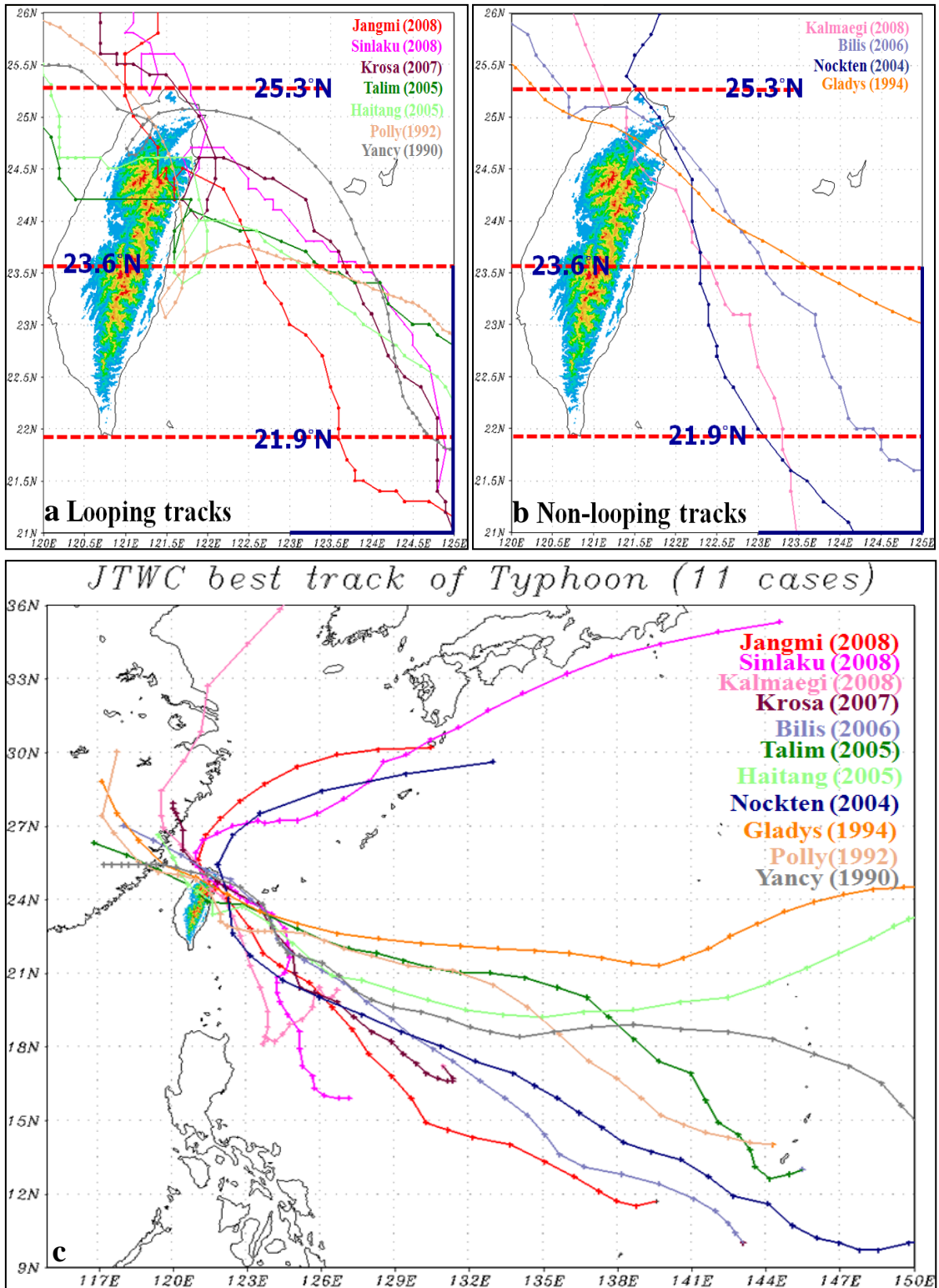


圖 2-1 1990~2009 年西北行侵台颱風(a)侵台期間打轉的 7 個颱風(薔蜜, 2008 ; 辛樂克, 2008 ; 柯羅莎, 2007 ; 泰利, 2005 ; 海棠, 2005 ; 寶莉, 1992 ; 楊希, 1990)、(b) 侵台期間未打轉的 4 個颱風 (卡玫基, 2008 ; 碧利斯, 2006 ; 納坦, 2004 ; 葛拉絲, 1994)、(c) 全部個案生命期路徑圖。(楊希、寶莉和葛拉絲使用王時鼎之再分析路徑資料, 其餘個案使用 CWB 颱風警報單上定位)



圖 2-2 CWB 局屬測站位置圖，紅圓點由北到南依序是 466990 花蓮測站 (23°58'37"N、121°36'18"E, 高度 16.0 m); 467610 成功測站 (23°05'57"N、121°21'55"E, 高度 33.5 m); 467660 臺東測站 (22°45'15"N、121°08'48"E, 高度 9.0 m); 467540 大武測站 (22°21'27"N、120°53'44"E, 高度 8.1m)。

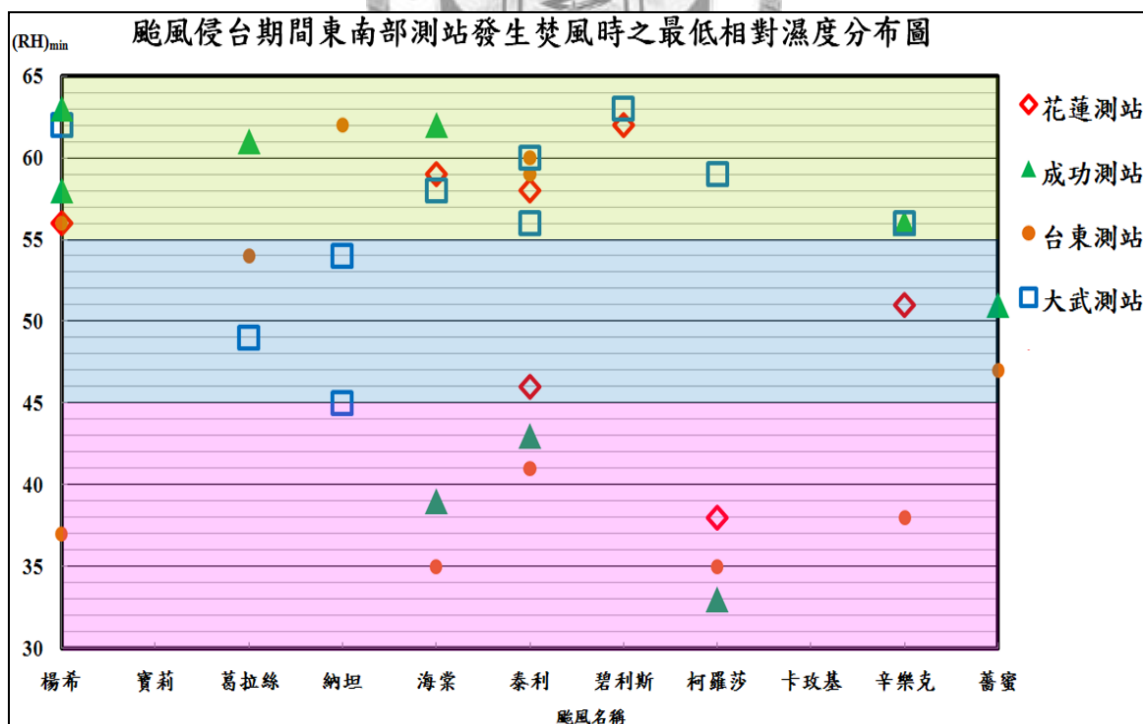


圖 2-3 颱風侵台期間 (登陸前 24 hr~登陸後 12 hr) 花蓮、成功、台東和大武測站於焚風發生時之最低相對濕度 (RH_{min}, 單位為%) 分布圖。

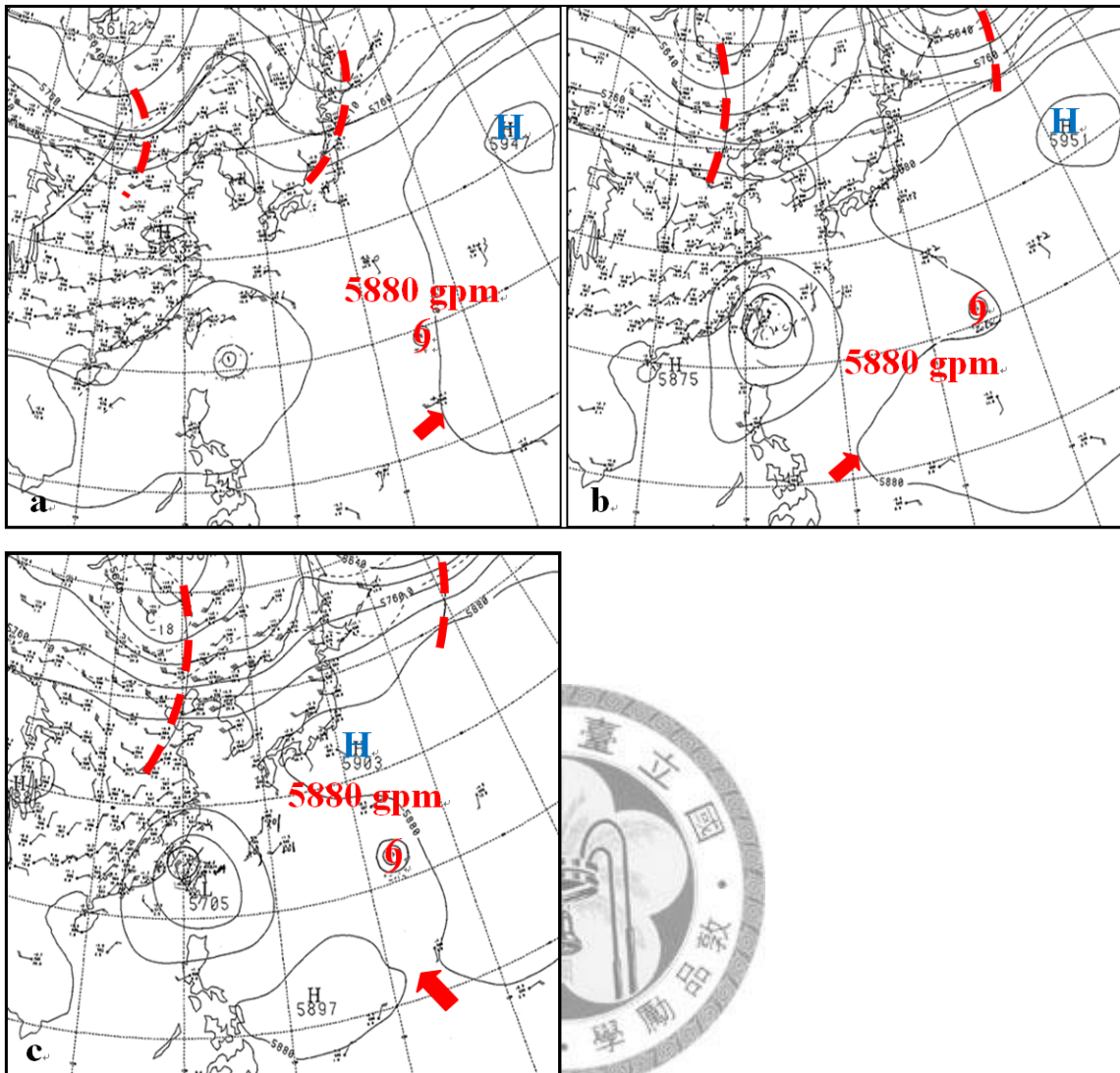


圖 2-4 楊希颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 8 月 (a) 18 日 0000 UTC、(b) 19 日 0000 UTC、(c) 19 日 1200 UTC，紅色虛線為中緯度槽線，箭頭為副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西側或為其減弱一分為二的位置。(資料來源: CWB)

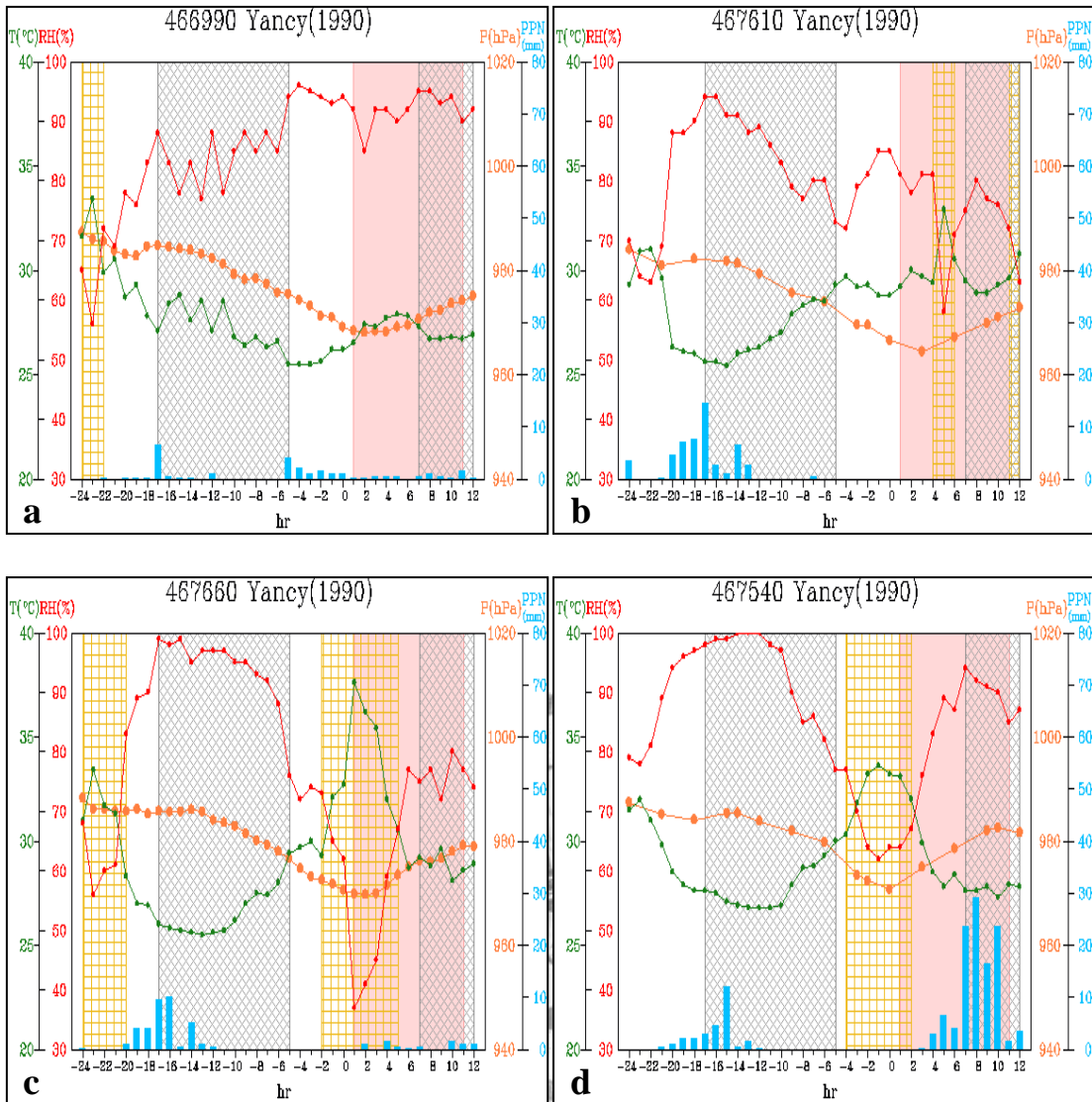


圖 2-5 楊希颱風登陸前 24 hr~登陸後 12 hr(8 月 18 日 0300 UTC~19 日 1500 UTC) 東南部測站地面觀測資料時間序列, 橫軸為相對登陸之小時數(h), 綠線、紅線、橘線和藍直條依序為氣溫(°C)、相對濕度(%), 測站氣壓(hPa)和時雨量(mm), 灰色、粉紅色和橘色區域依序為夜間(1000~2200 UTC)、颱風打轉期間和焚風發生期間 (a) 花蓮測站、(b) 成功測站、(c) 台東測站、(d) 大武測站。(資料來源: CWB)

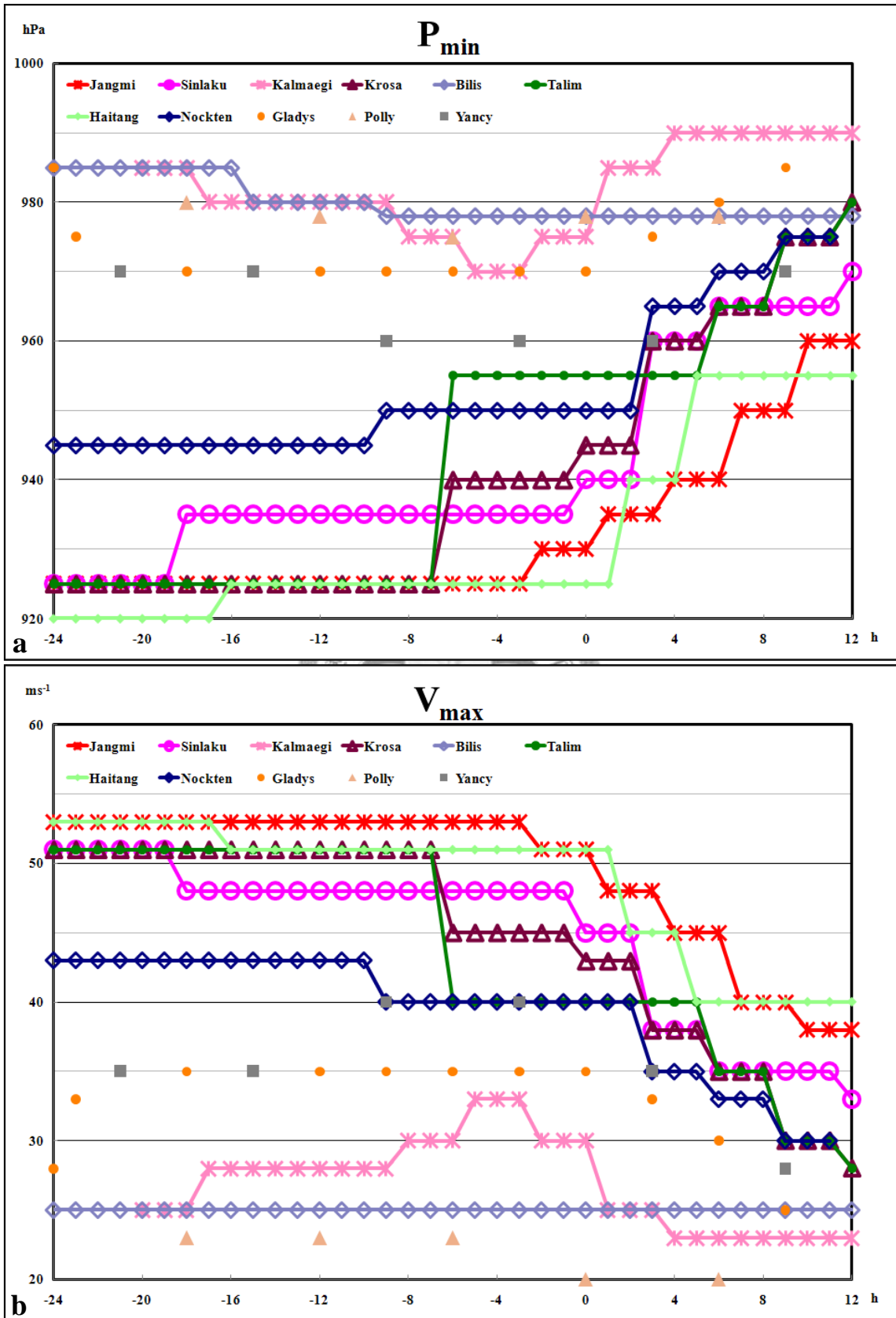


圖 2-6 11 個颱風侵台期間（登陸前 24 hr～登陸後 12 hr）之中心最低氣壓（ P_{min} ）和平均最大風速（ V_{max} ）圖，橫軸為相對登陸之小時數（a） P_{min} 、（b） V_{max} 。（資料來源：CWB）

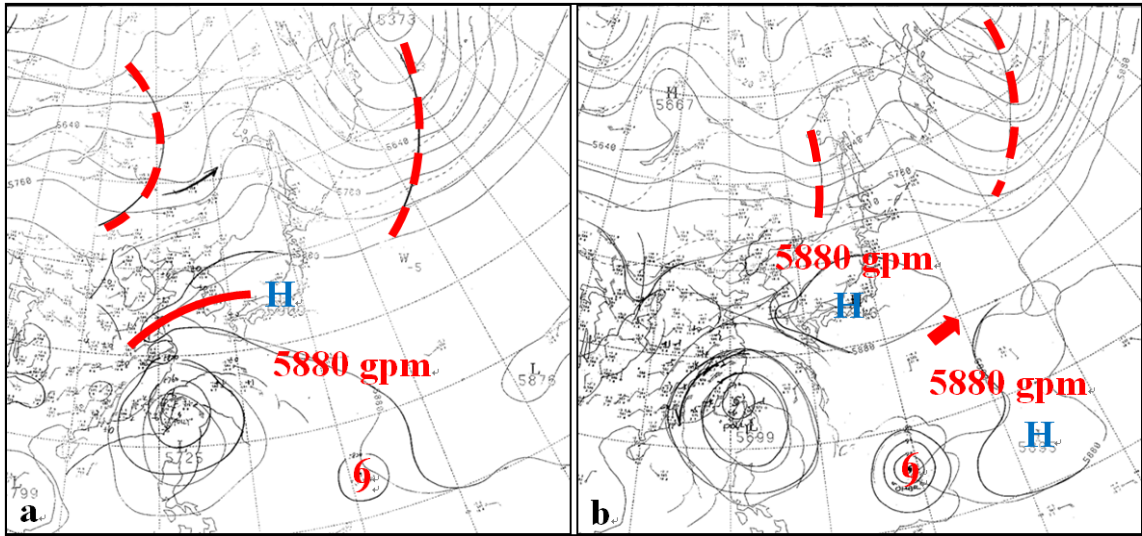


圖 2-7 寶莉颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 8 月 (a) 29 日 1200 UTC、(b) 30 日 1200 UTC，紅色虛線、實線和箭頭依序為中緯度槽線、太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線和副熱帶高壓減弱一分為二的位置。(資料來源：CWB)

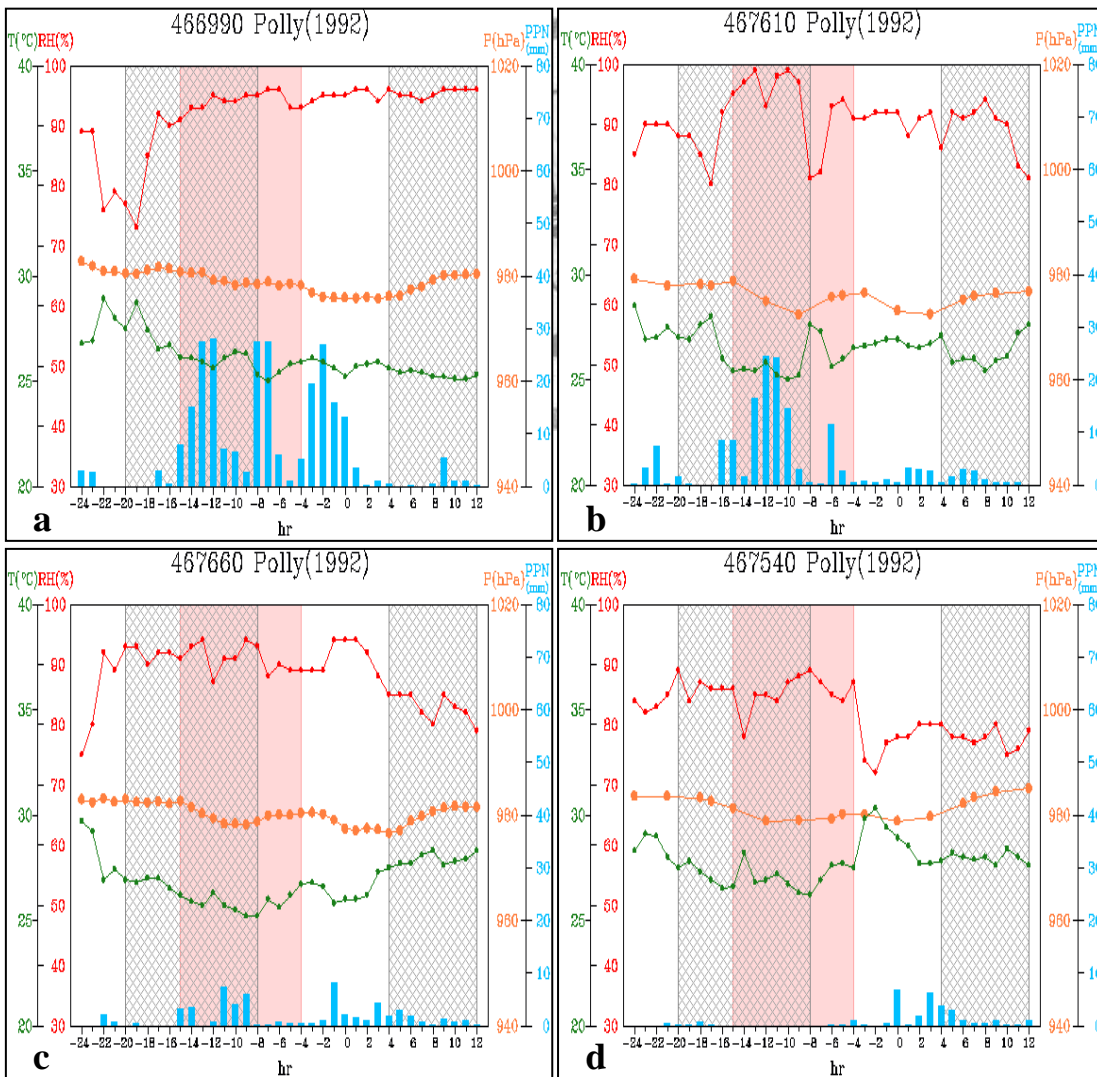


圖 2-8 同圖 2-5，但為寶莉颱風 (8 月 29 日 0600 UTC~30 日 1800 UTC)。

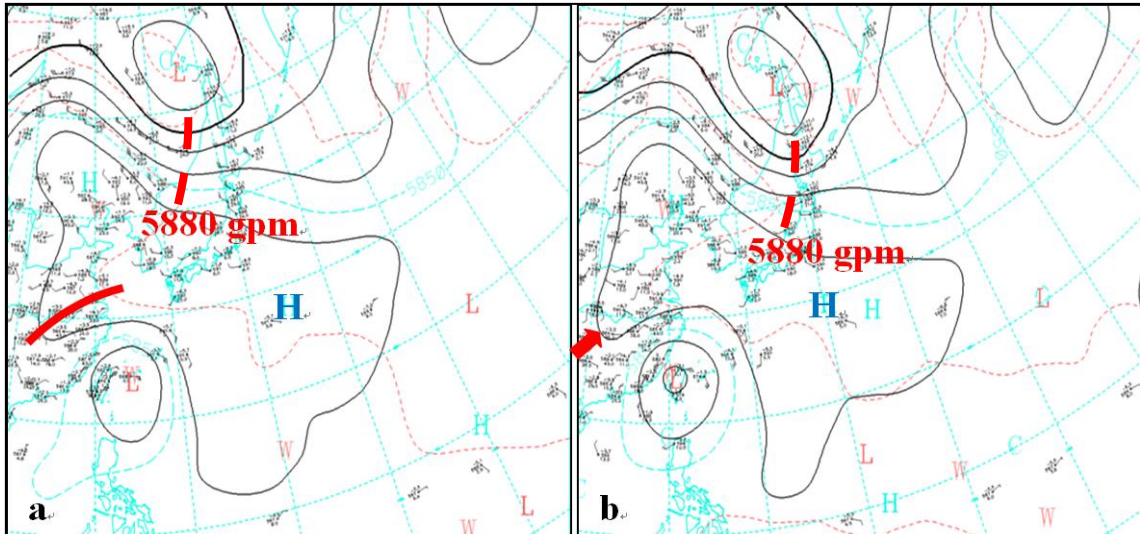


圖 2-9 海棠颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 7 月 (a) 17 日 1200 UTC、(b) 18 日 0000 UTC，紅色虛線、實線和箭頭依序為中緯度槽線、太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線和 5880 gpm 等值線西側的位置。(資料來源：CWB)

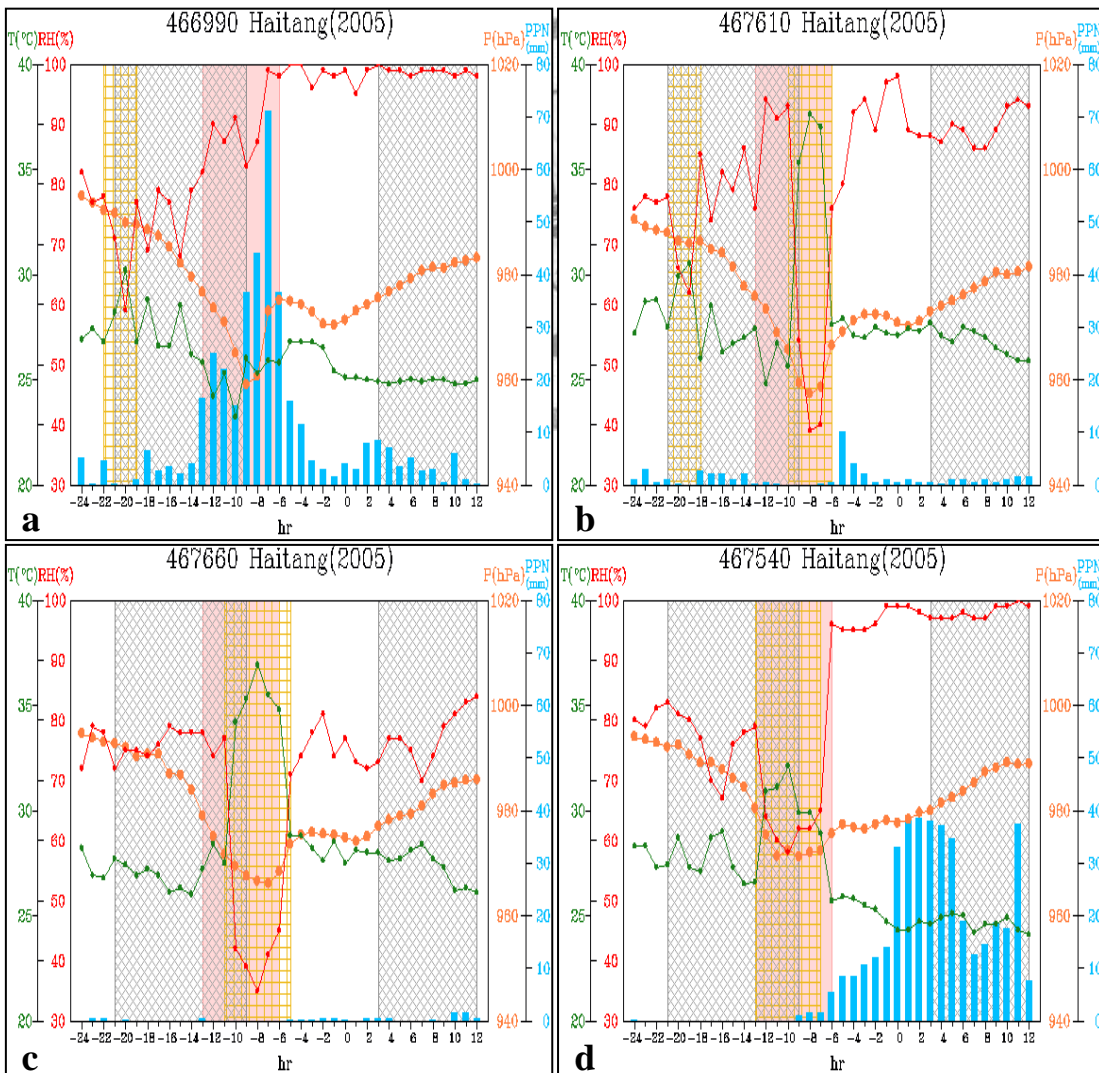


圖 2-10 同圖 2-5，但為海棠颱風 (7 月 17 日 0700 UTC~18 日 1900 UTC)。

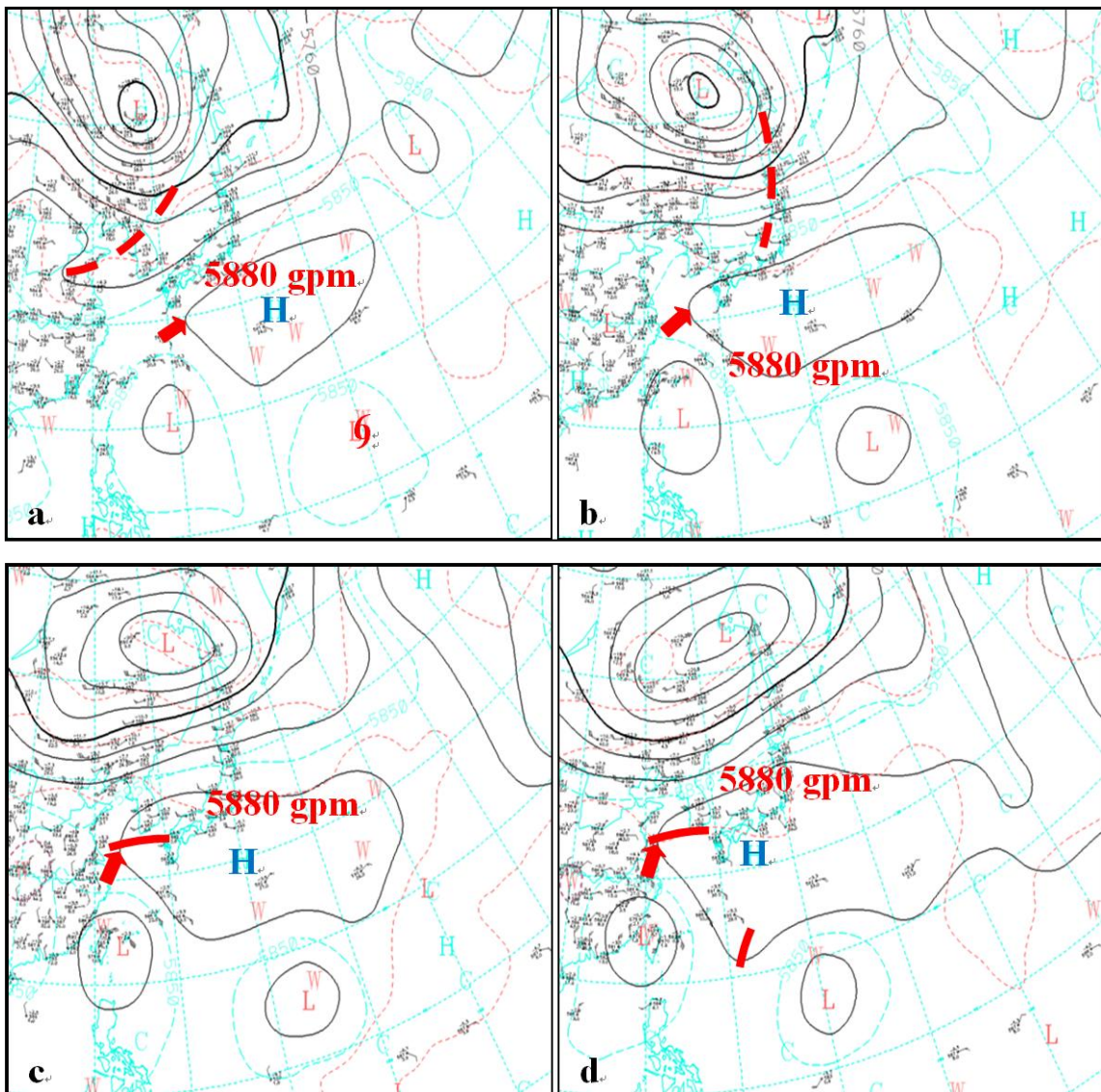


圖 2-11 同圖 2-9，但為泰利颱風，時間為 8 月 (a) 30 日 0000 UTC、(b) 31 日 0000 UTC、(c) 31 日 1200 UTC、(d) 9 月 1 日 0000 UTC。

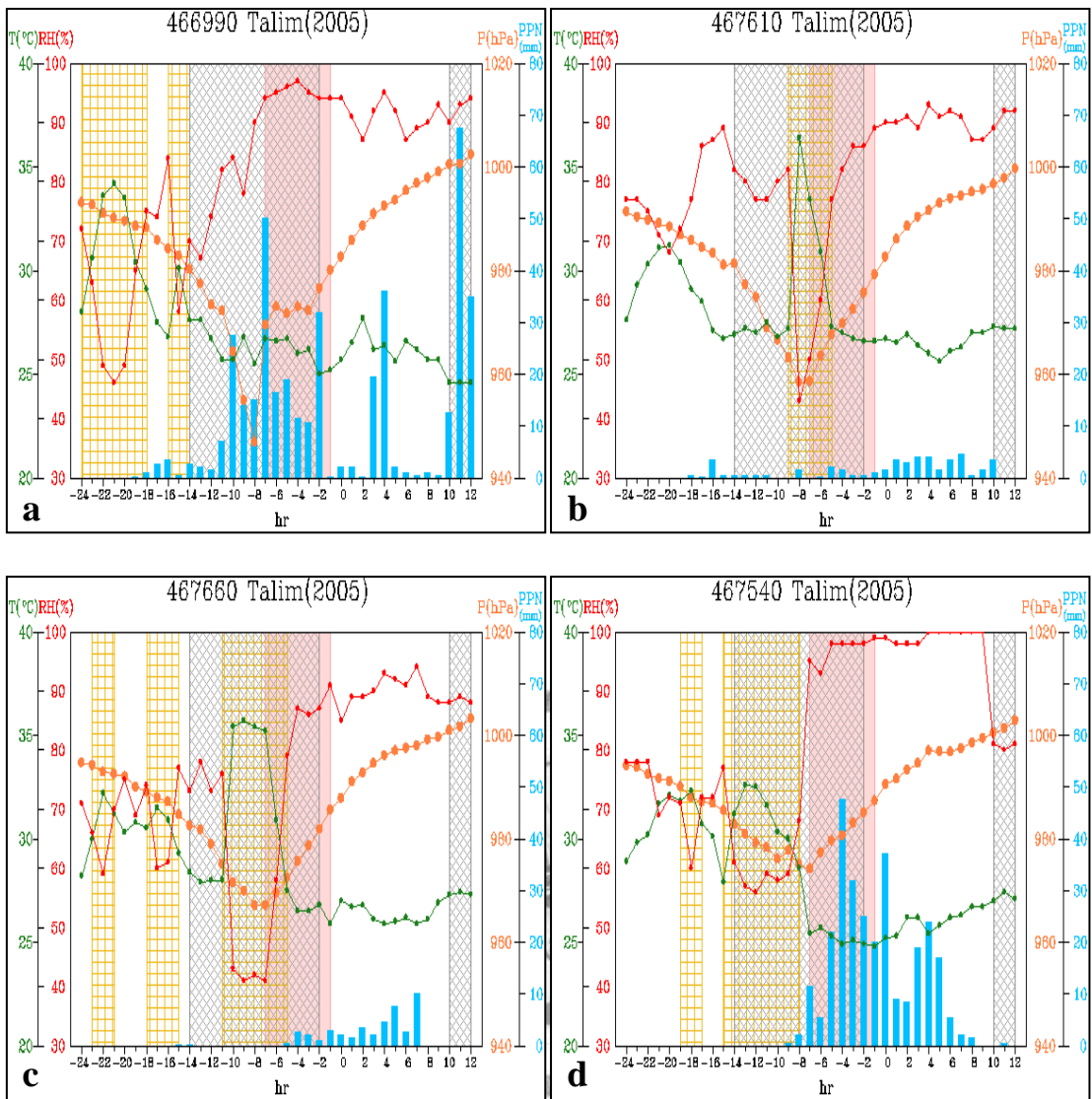


圖 2-12 同圖 2-5，但為泰利颱風（8 月 31 日 0000 UTC~9 月 1 日 1200 UTC）。

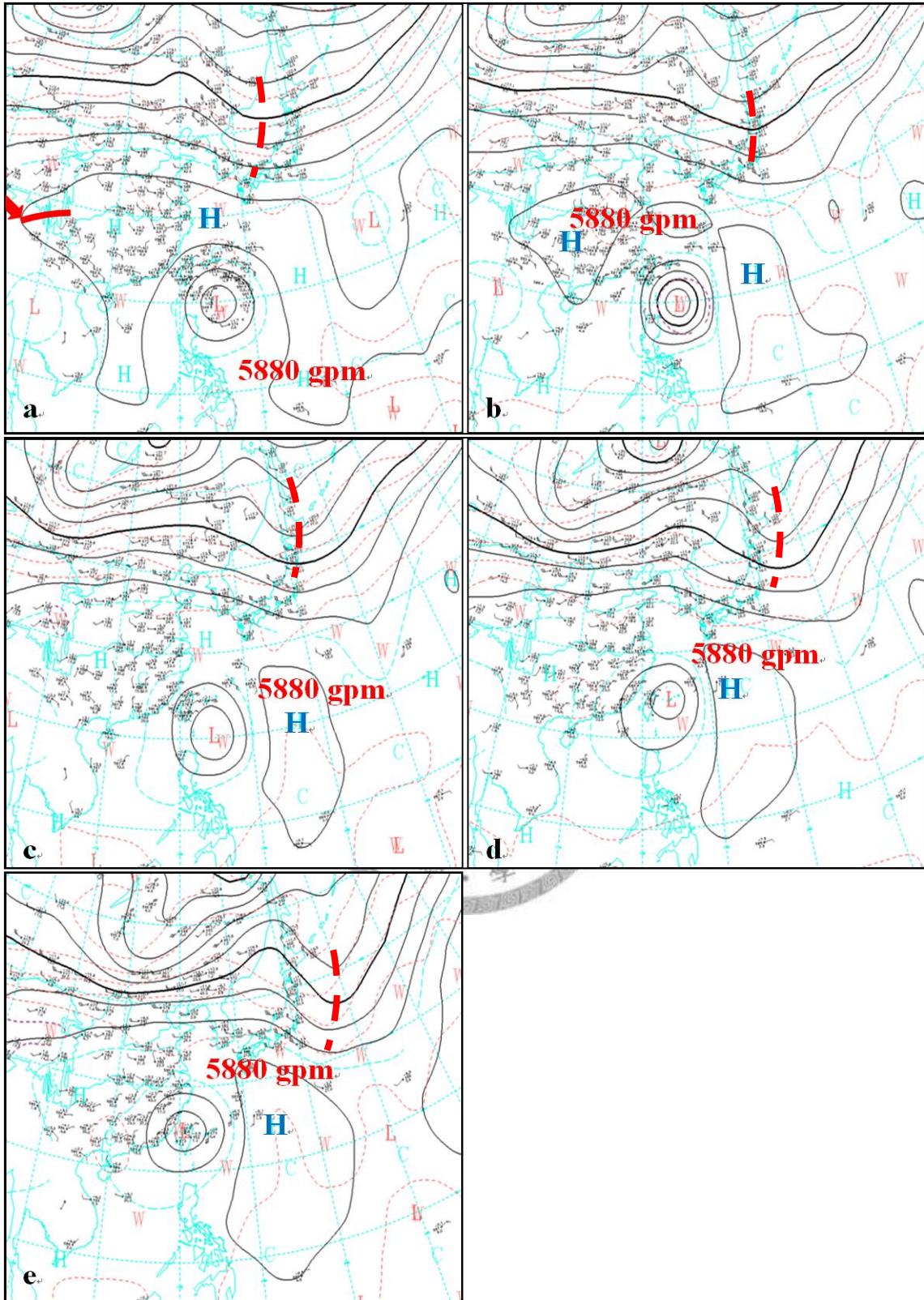


圖 2-13 同圖 2-9，但為柯羅莎颱風，時間為 10 月 (a) 4 日 1200 UTC、(b) 5 日 0000 UTC、(c) 5 日 1200 UTC、(d) 6 日 0000 UTC、(e) 6 日 1200 UTC。

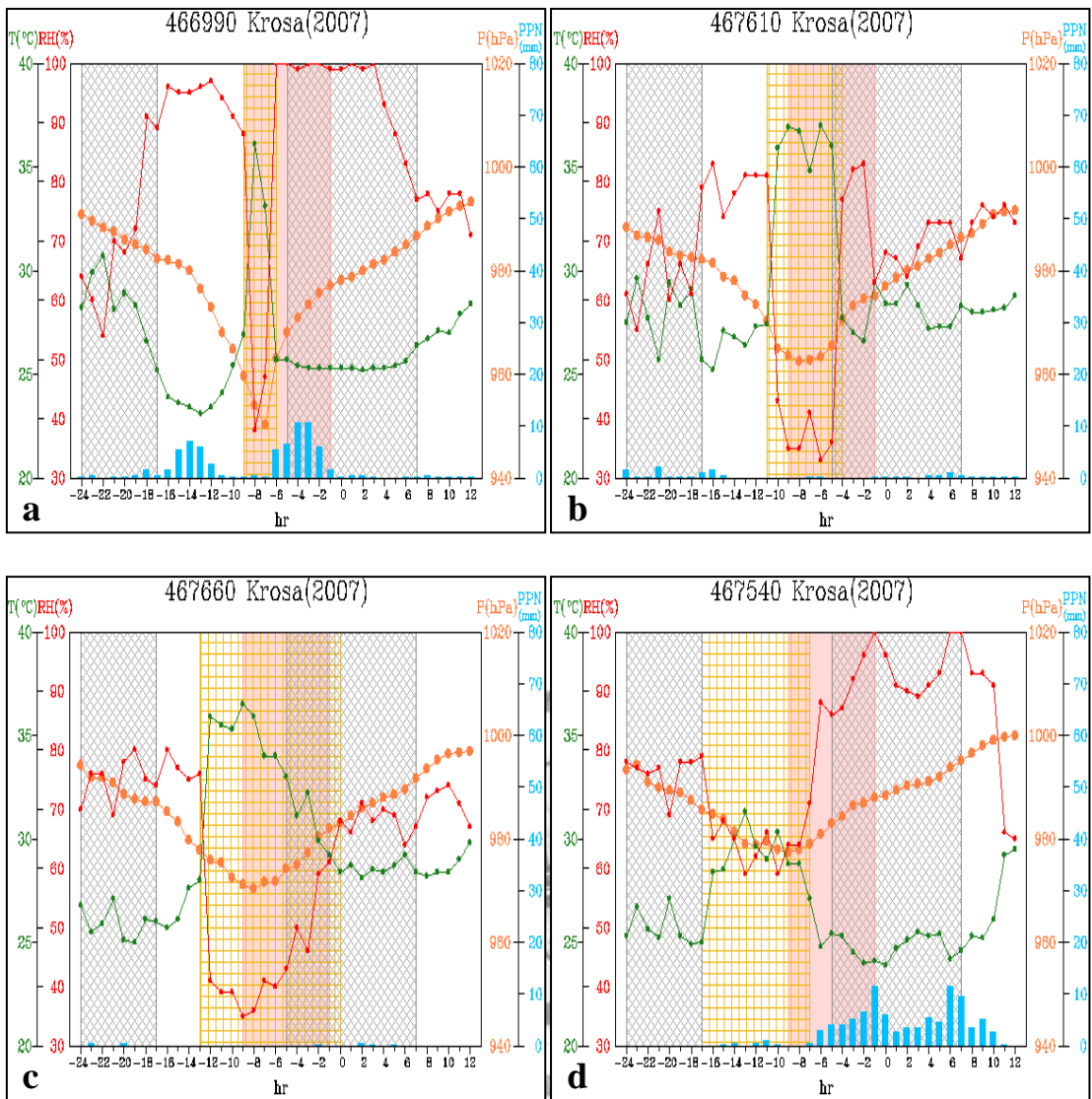


圖 2-14 同圖 2-5，但為柯羅莎颱風（10 月 5 日 1500 UTC～7 日 0300 UTC）。

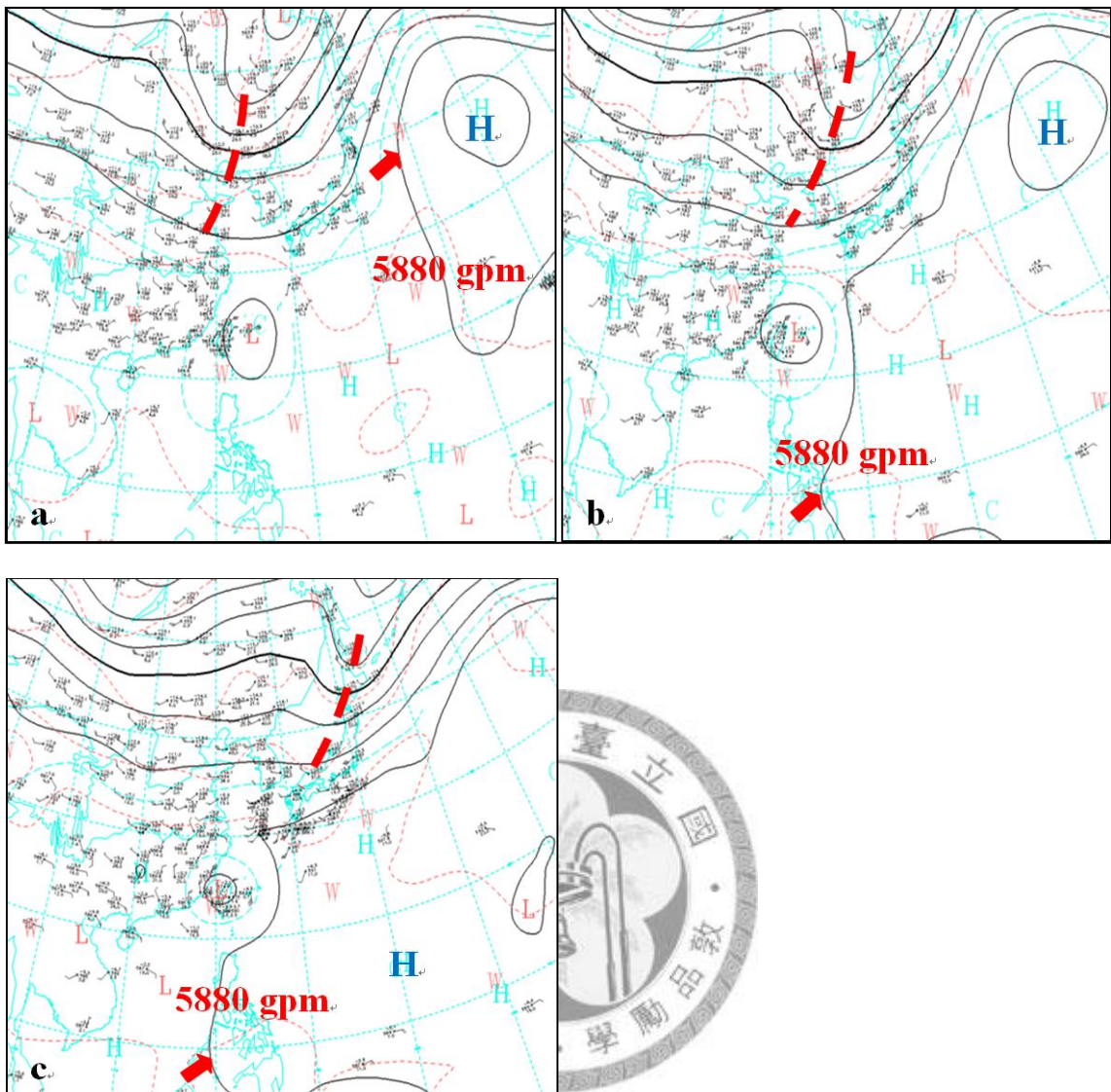


圖 2-15 辛樂克颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 9 月 (a) 12 日 0000 UTC、(b) 13 日 0000 UTC、(c) 14 日 0000 UTC，紅色虛線和箭頭分別為中緯度槽線和副熱帶高壓 5880 gpm 等值線西側的位置。(資料來源：CWB)

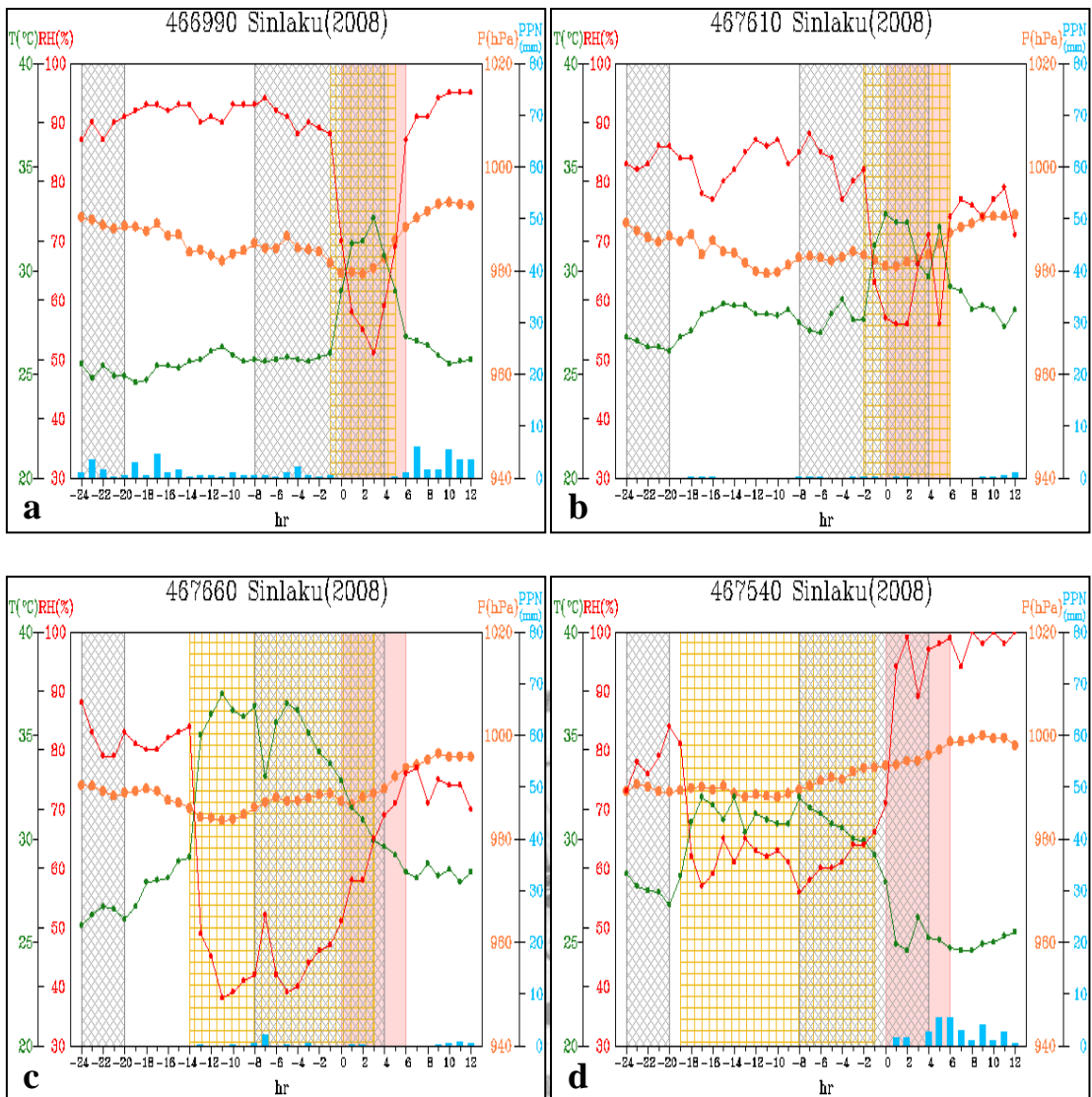


圖 2-16 同圖 2-5，但為辛樂克颱風（9 月 12 日 1800 UTC~14 日 0600 UTC）。

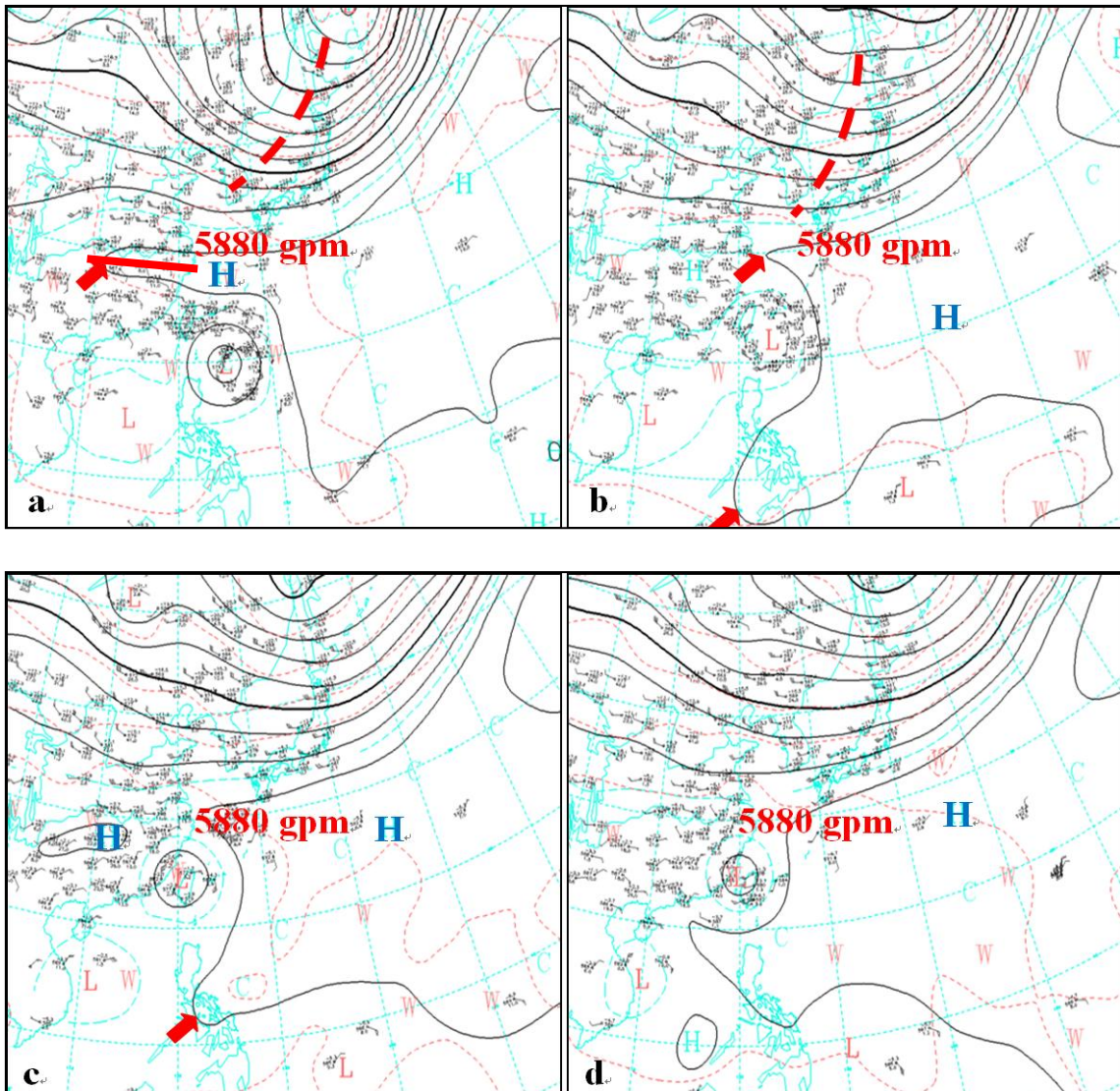


圖 2-17 同圖 2-9，但為蕃蜜颱風，時間為 9 月 (a) 27 日 0000 UTC、(b) 28 日 0000 UTC、(c) 28 日 1200 UTC、(d) 29 日 0000 UTC。

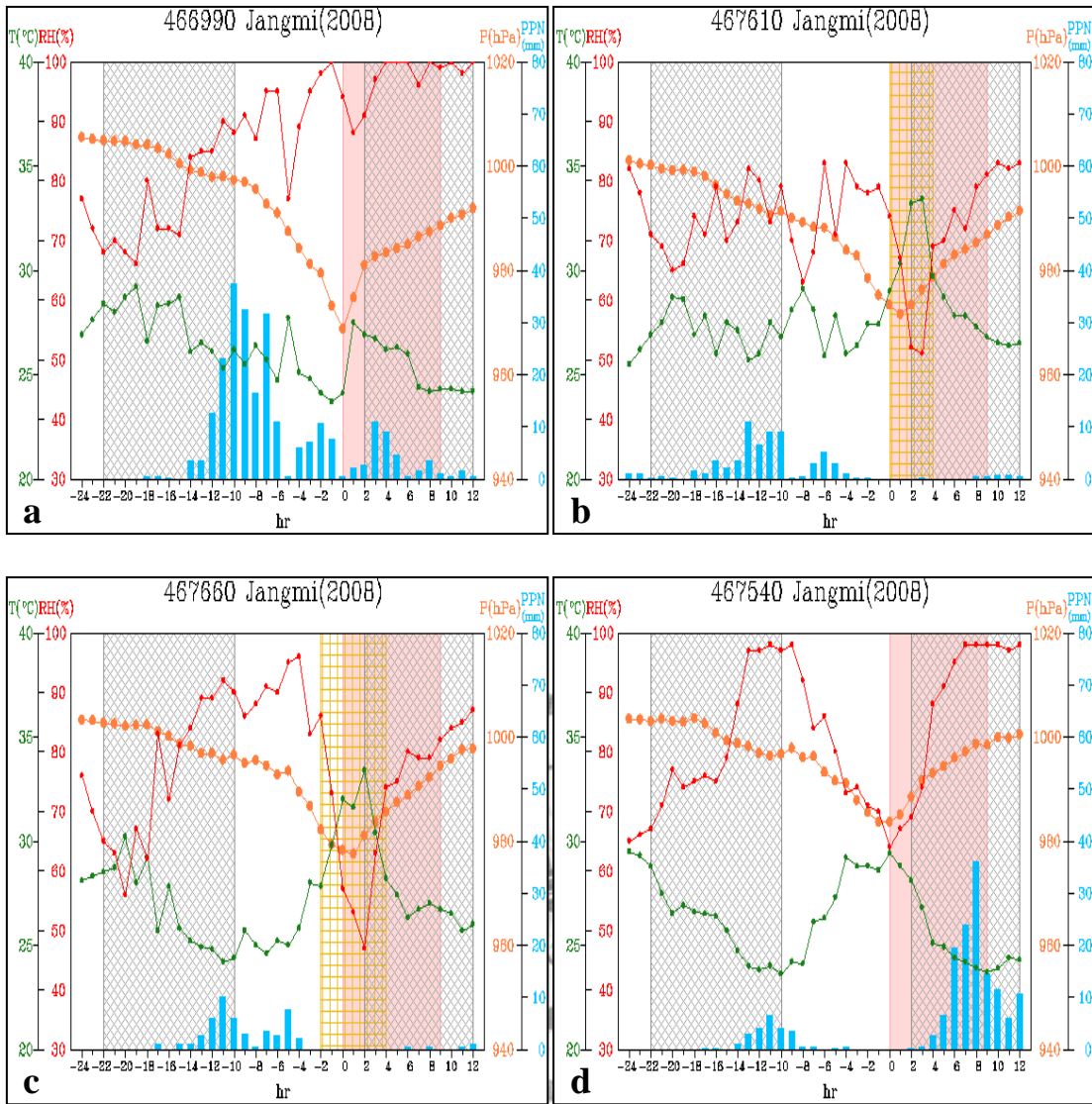


圖 2-18 同圖 2-5，但為薔蜜颱風（9 月 27 日 0800 UTC~28 日 2000 UTC）。

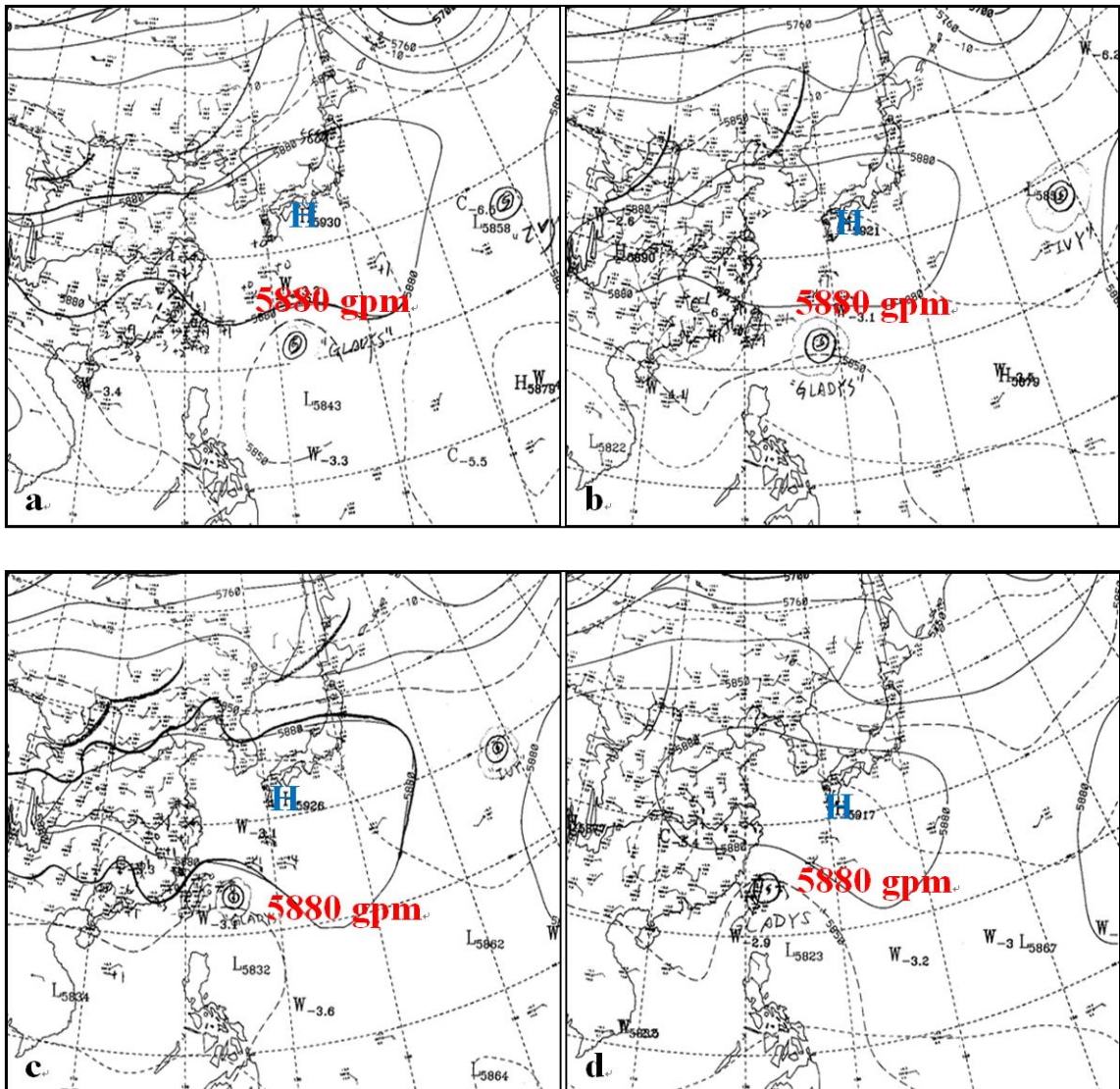


圖 2-19 葛拉絲颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 8 月 (a) 30 日 1200 UTC、(b) 31 日 0000 UTC、(c) 31 日 1200 UTC、(d) 9 月 1 日 0000 UTC。(資料來源：CWB)

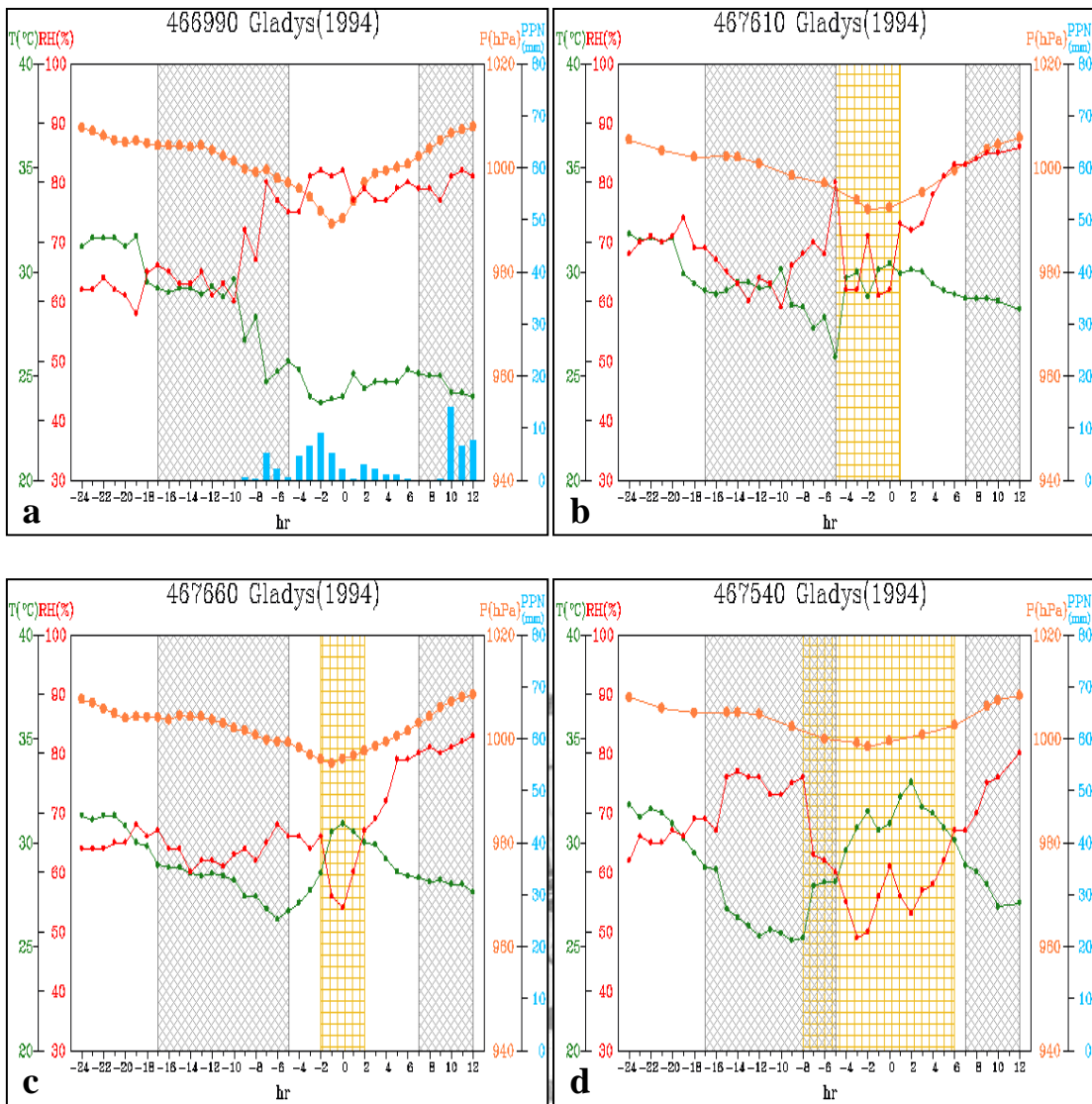


圖 2-20 同圖 2-5，但為葛拉絲颱風（8 月 31 日 0300 UTC～9 月 1 日 1500 UTC）。

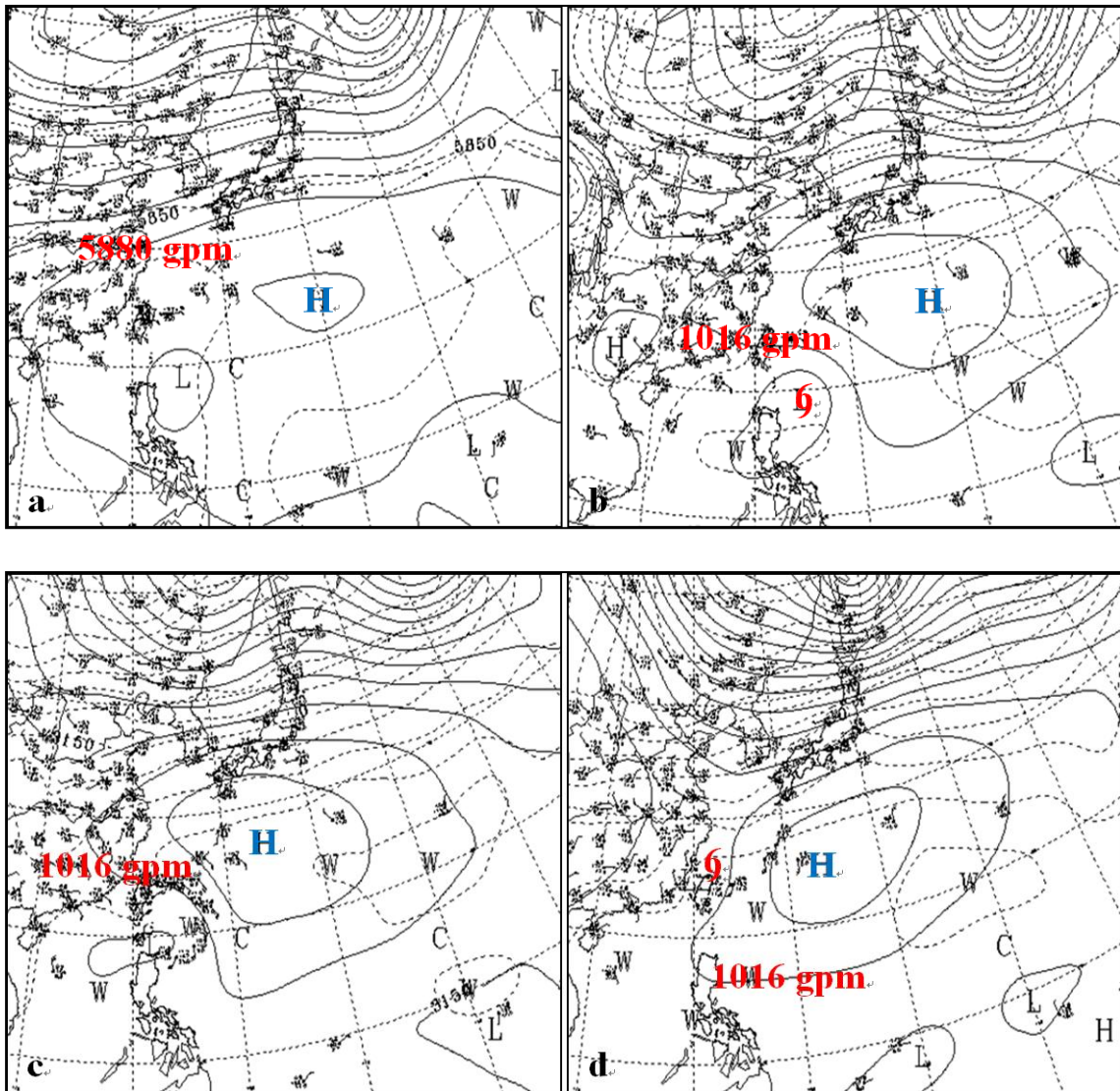


圖 2-21 納坦颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 10 月(a)24 日 0000 UTC、(b) 24 日 0000 UTC (700 hPa)、(c) 24 日 1200 UTC (700 hPa)、(d) 25 日 1200 UTC (700 hPa)。(資料來源：CWB)

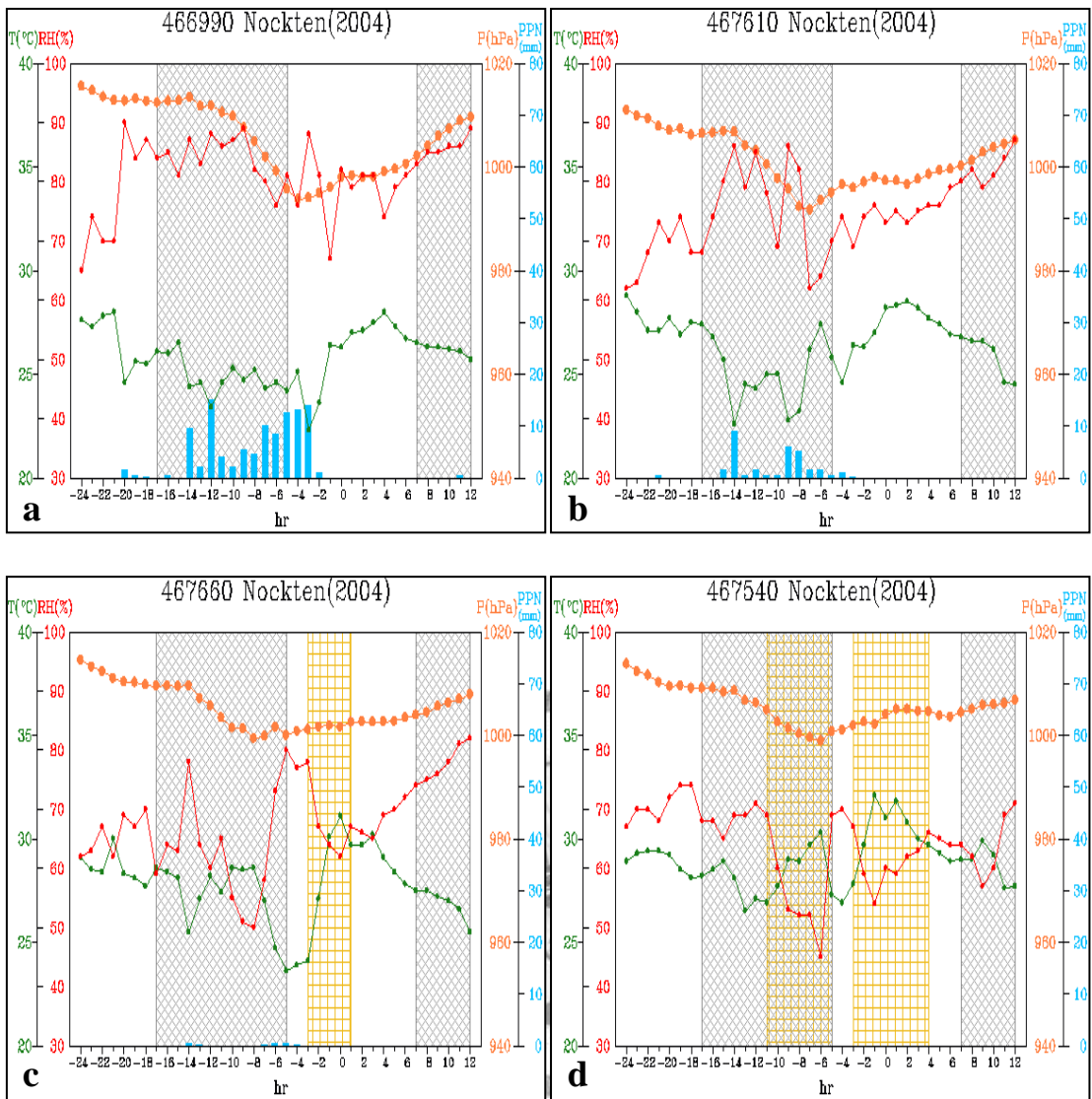


圖 2-22 同圖 2-5，但為納坦颱風（10 月 24 日 0300 UTC~25 日 1500 UTC）。

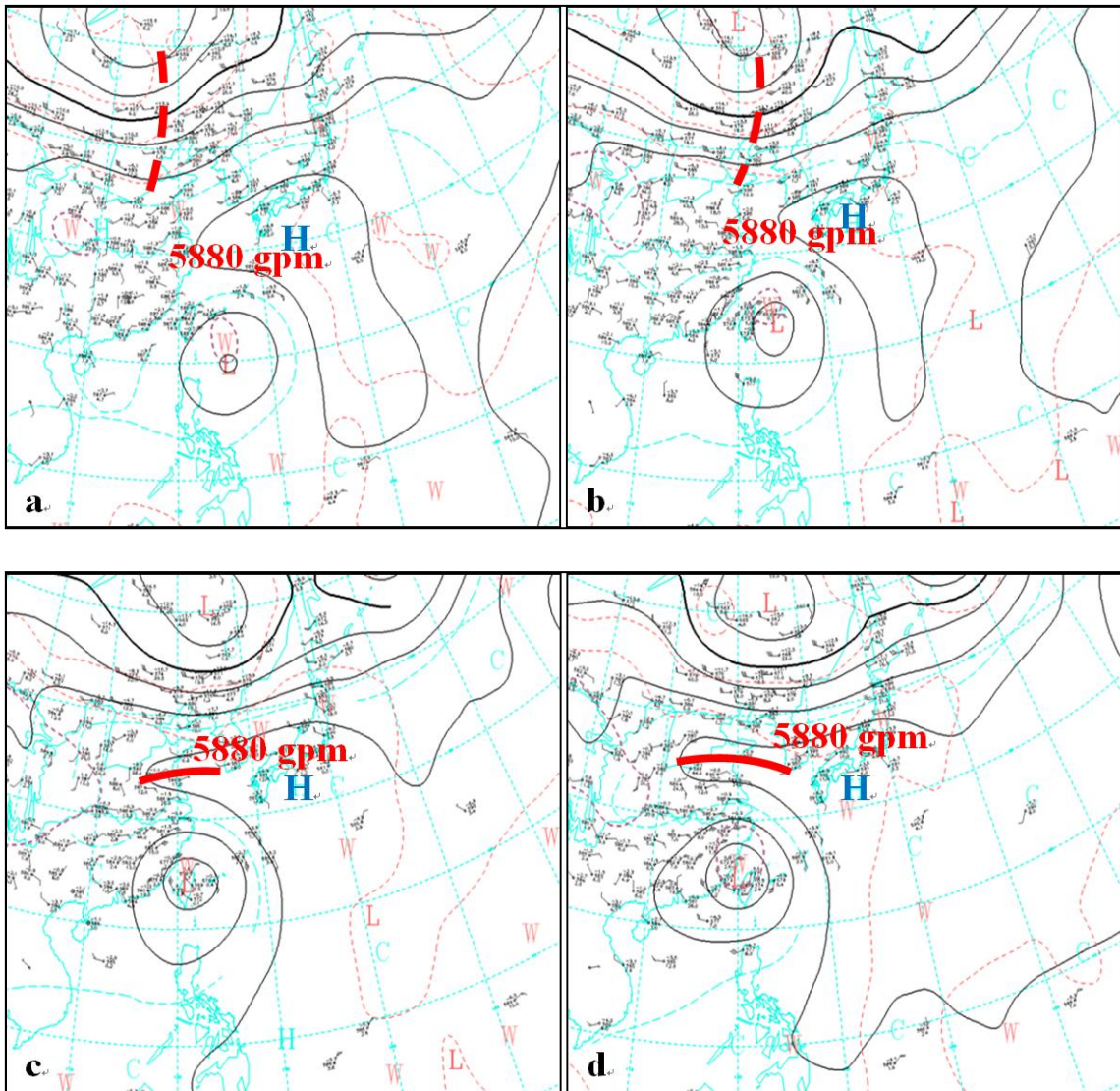


圖 2-23 碧利斯颱風侵台期間 500 hPa 天氣圖，時間為 7 月 (a) 12 日 0000 UTC、(b) 13 日 0000 UTC、(c) 13 日 1200 UTC、(d) 14 日 0000 UTC，紅色虛線和實線分別為中緯度槽線和太平洋副熱帶高壓 5880 gpm 等值線脊線。(資料來源：CWB)

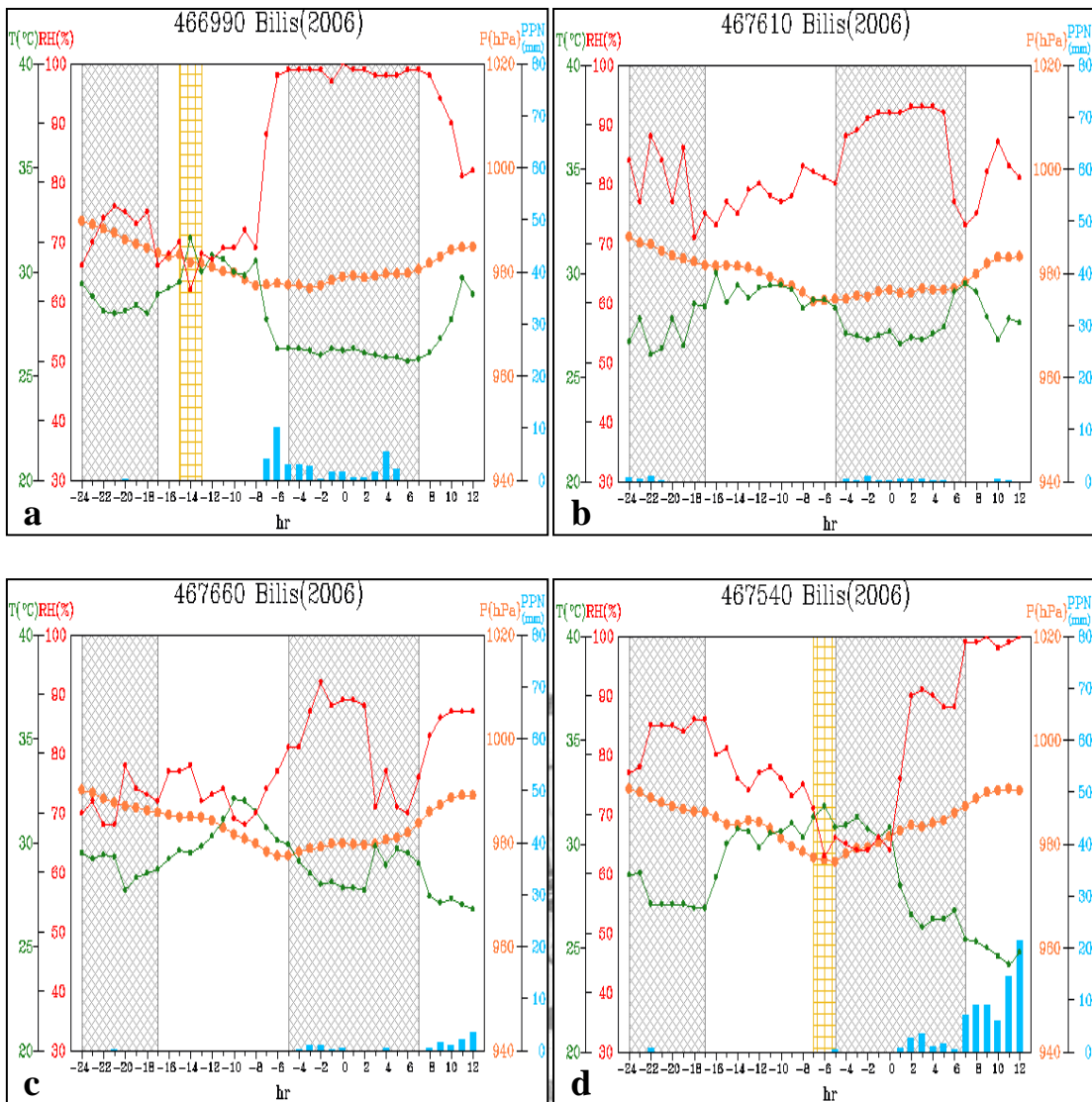


圖 2-24 同圖 2-5，但為碧利斯颱風（7 月 12 日 1500 UTC~14 日 0300 UTC）。

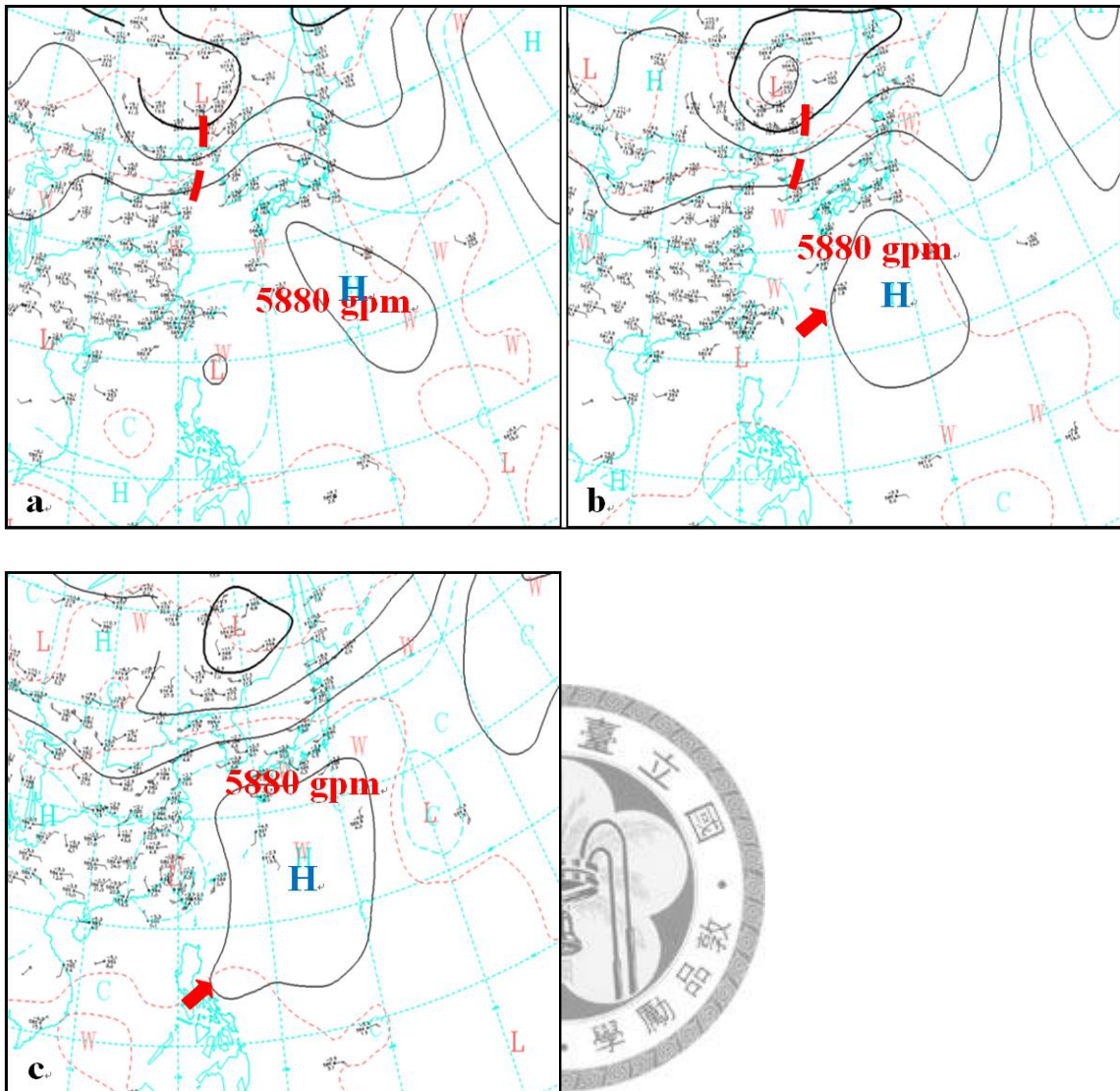


圖 2-25 同圖 2-9，但為卡孜基颱風，時間為 7 月 (a) 16 日 0000 UTC、(b) 17 日 0000 UTC、(c) 18 日 0000 UTC。

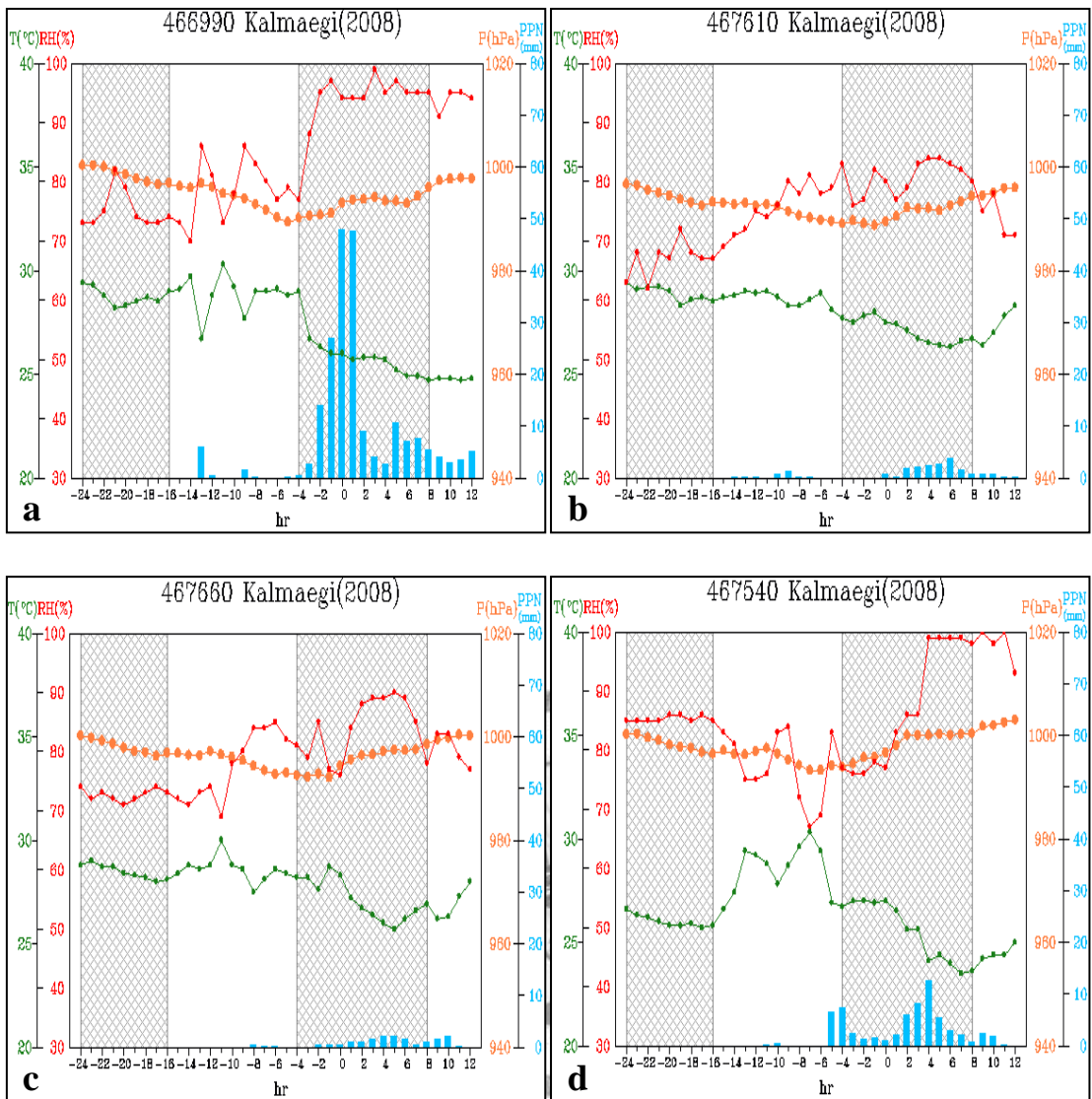


圖 2-26 同圖 2-5，但為卡玫基颱風（7 月 16 日 1400 UTC~18 日 0200 UTC）。

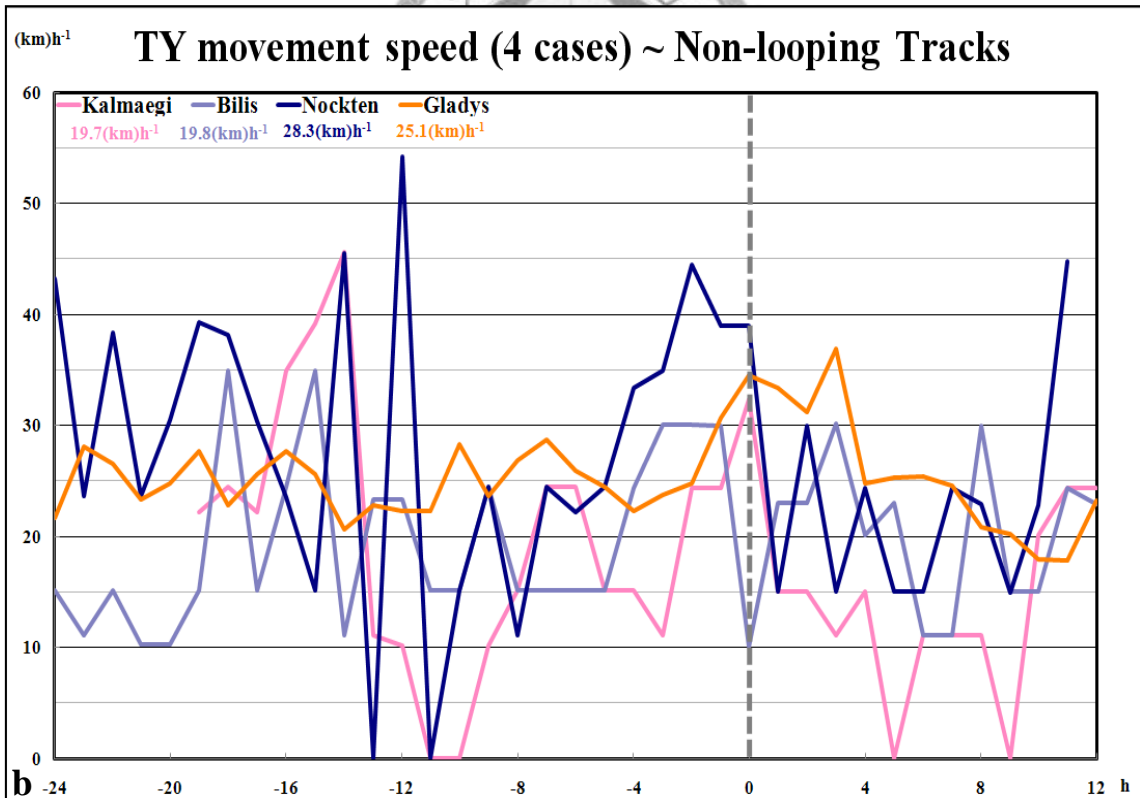
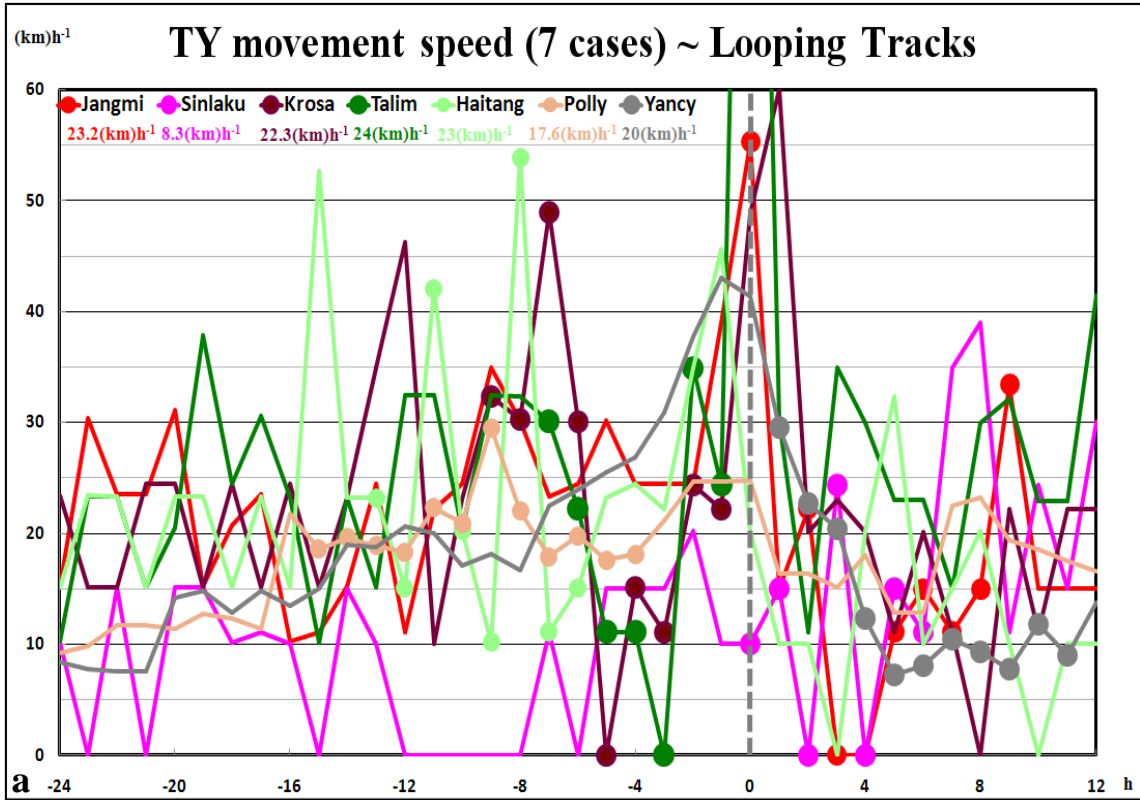


圖 2-27 打轉 (a) 與未打轉 (b) 颱風登陸前 24 hr ~ 登陸後 12 hr 的逐時移速圖，橫軸為相對登陸 (灰虛線) 之小時數 (h)，縱軸為移速 (km h^{-1})，圓點表颱風正發生打轉，颱風名字下之數字代表打轉 (未打轉) 颱風打轉前 (登陸前) 之平均移速。(資料來源：CWB)

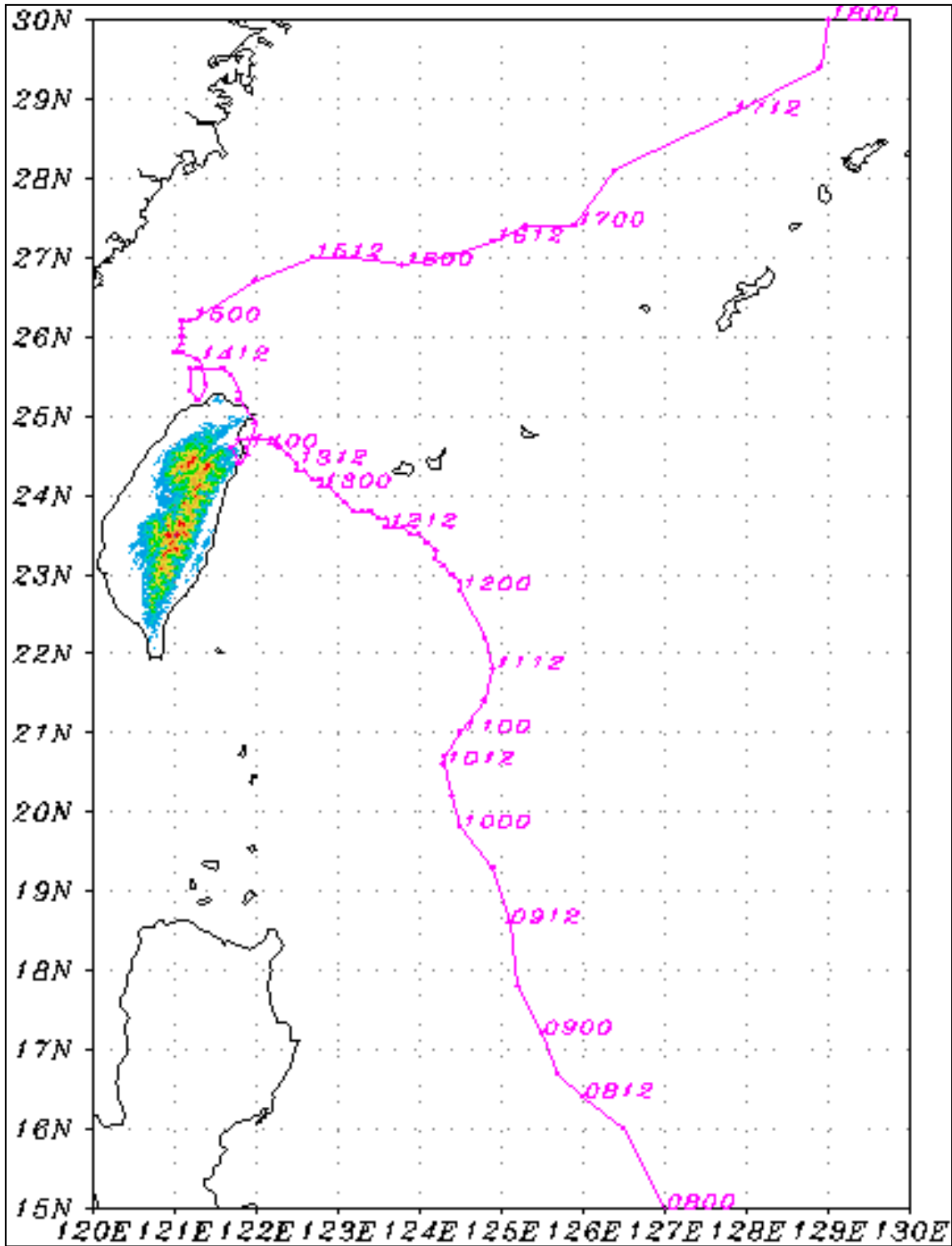


圖 3-1 辛樂克颱風路徑圖，時間：9月8日 0000 UTC~18日 0000 UTC。(資料來源：CWB 每 6 hr 定位資料，其中 12日 0000 UTC~15日 0000 UTC 為逐時定位)

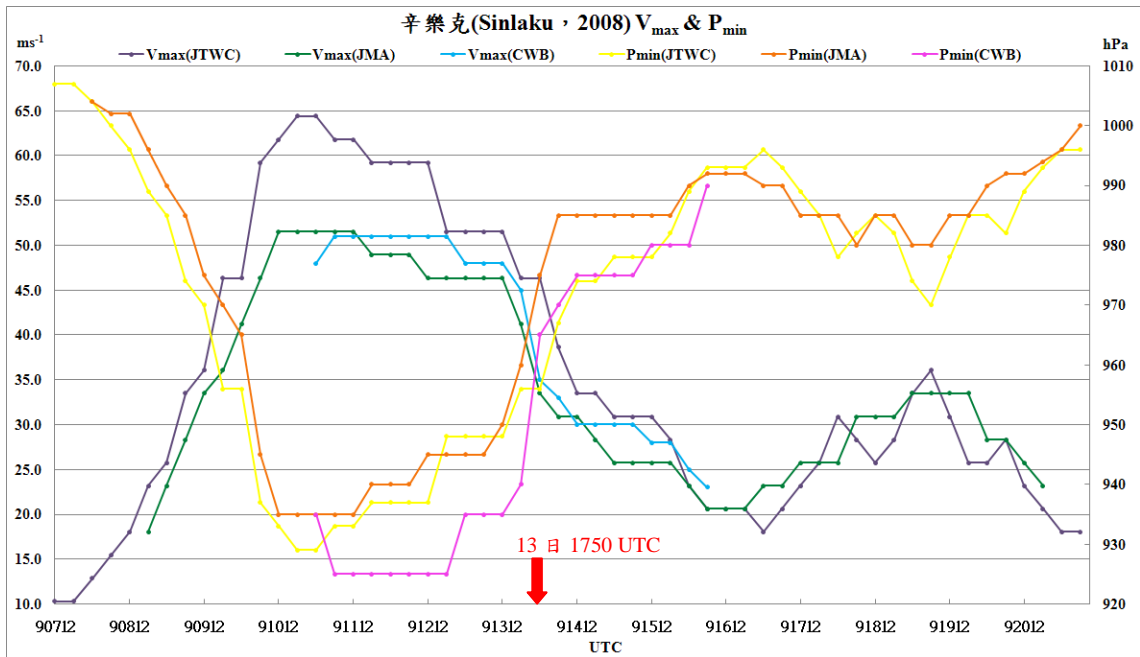


圖 3-2 辛樂克颱風強度變化圖，包含中心最低氣壓 (P_{min} , hPa) 和平均最大風速 (V_{max} , ms^{-1})，紅色箭頭處代表颱風登陸時間 (13日 1750 UTC)。(資料來源：JTWC、JMA 和 CWB 每 6 hr 定位資料)

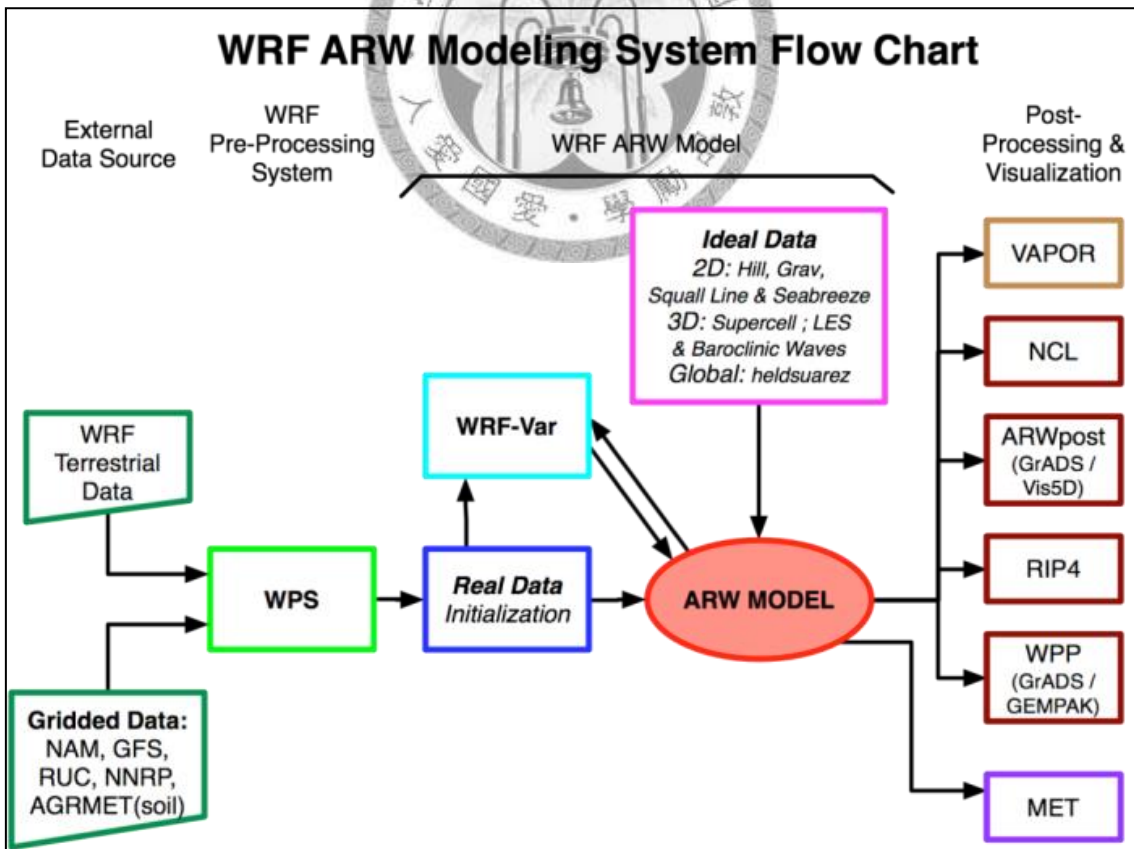


圖 3-3 WRF-ARW 流程圖。

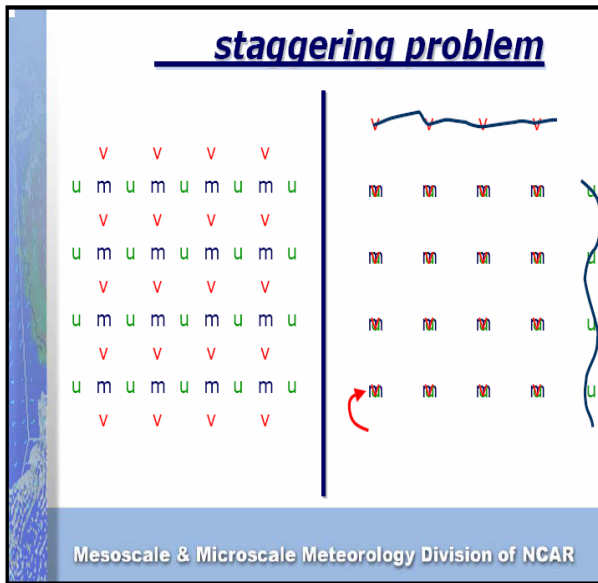


圖 3-4 Arakawa C Grid 的示意圖，u 和 v 為速度變數，m 為熱力變數。

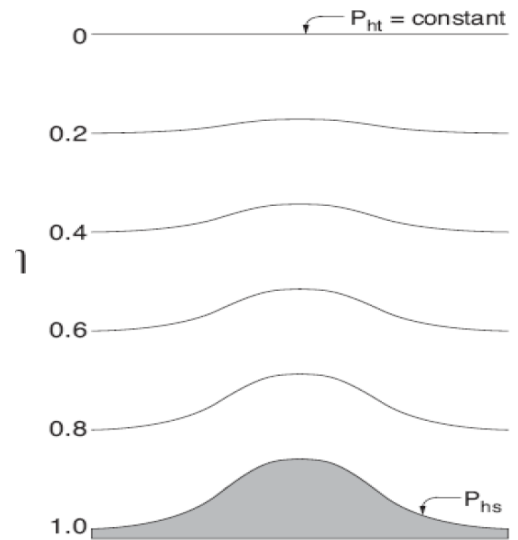


Figure 2.1: ARW η coordinate.

圖 3-5 ARW 垂直質量座標系統，摘自 Skamarock et al. (2005)。

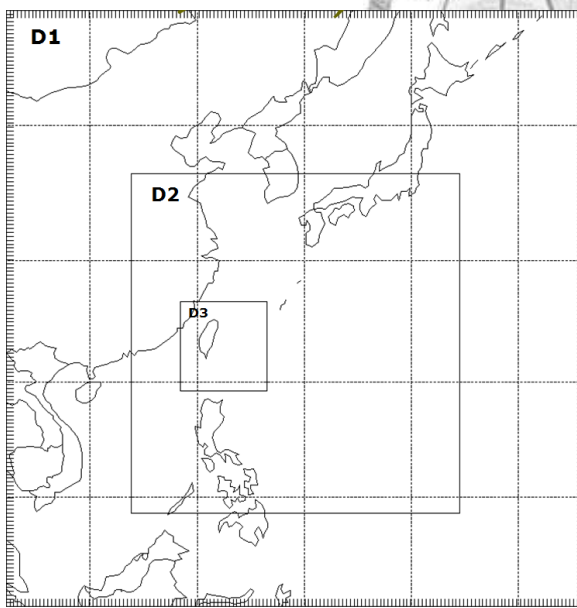


圖 3-6 三層巢狀網格配置圖（網格間距依序為 36、12 和 4 km）。

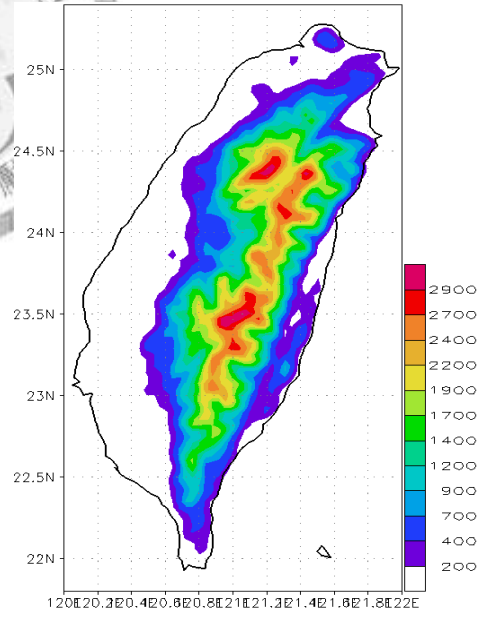


圖 3-7 控制組實驗 (CTRL) 最內層網巢所解析的台灣地形圖（解析度為 4 km）。

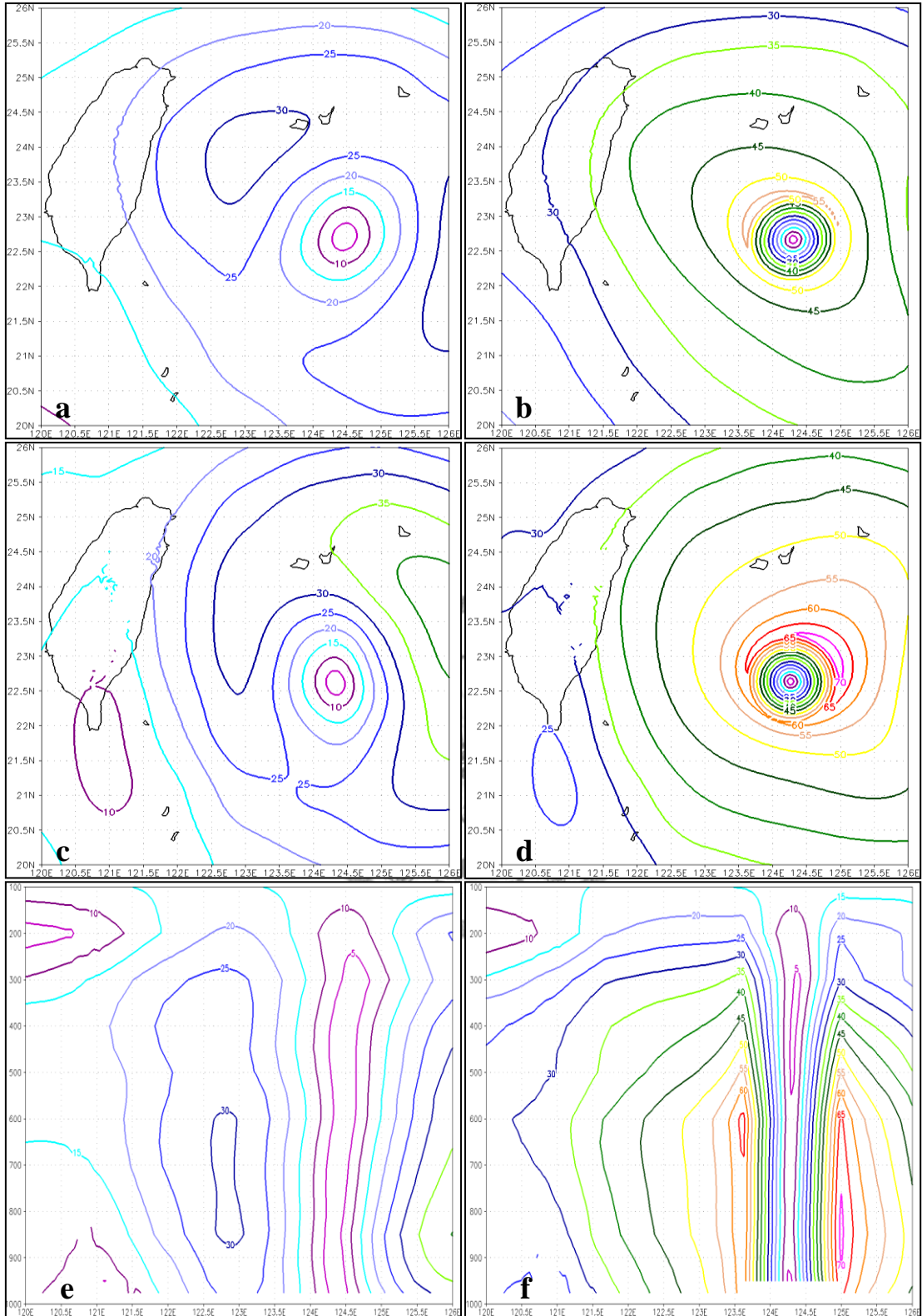


圖 3-8 模擬初始場(時間:9月12日0000 UTC,颱風中心位置 22.7°N、124.3°E) 第三層巢狀網格之風場 (ms^{-1}) 分布圖(等值線間距為 5ms^{-1}), 左圖為渦旋植入前, 右圖為植入渦旋後 (a) 500 hPa 切向風場、(b) 同 (a)、(c) 850 hPa 切向風場、(d) 同 (c)、(e) 22.7°N 切向風場垂直剖面、(f) 同 (e)。

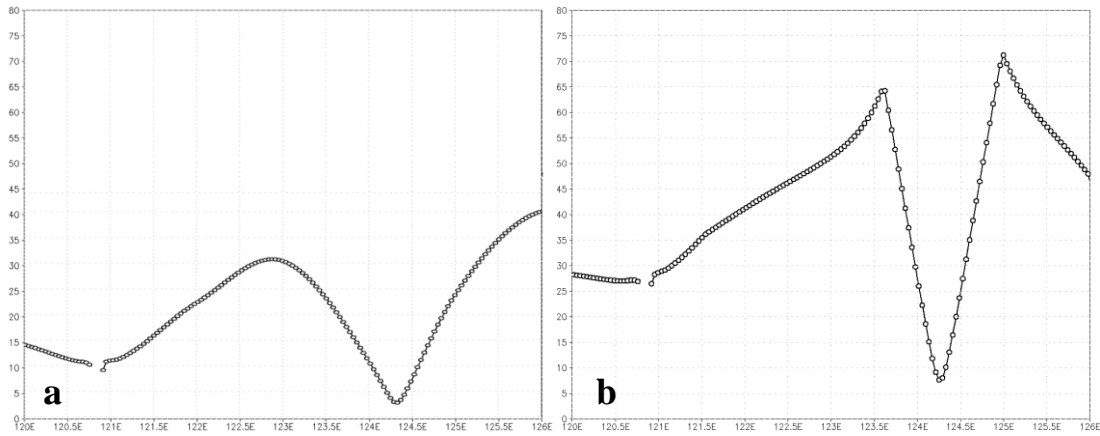


圖 3-9 模擬初始場(時間:9月12日0000 UTC, 颱風中心位置 22.7°N、124.3°E) 第三層巢狀網格渦旋植入前後之 22.7°N、120~126°E 的 850 hPa 風場(ms^{-1}) 水平剖面圖 (a) 植入渦旋前、(b) 植入渦旋後。

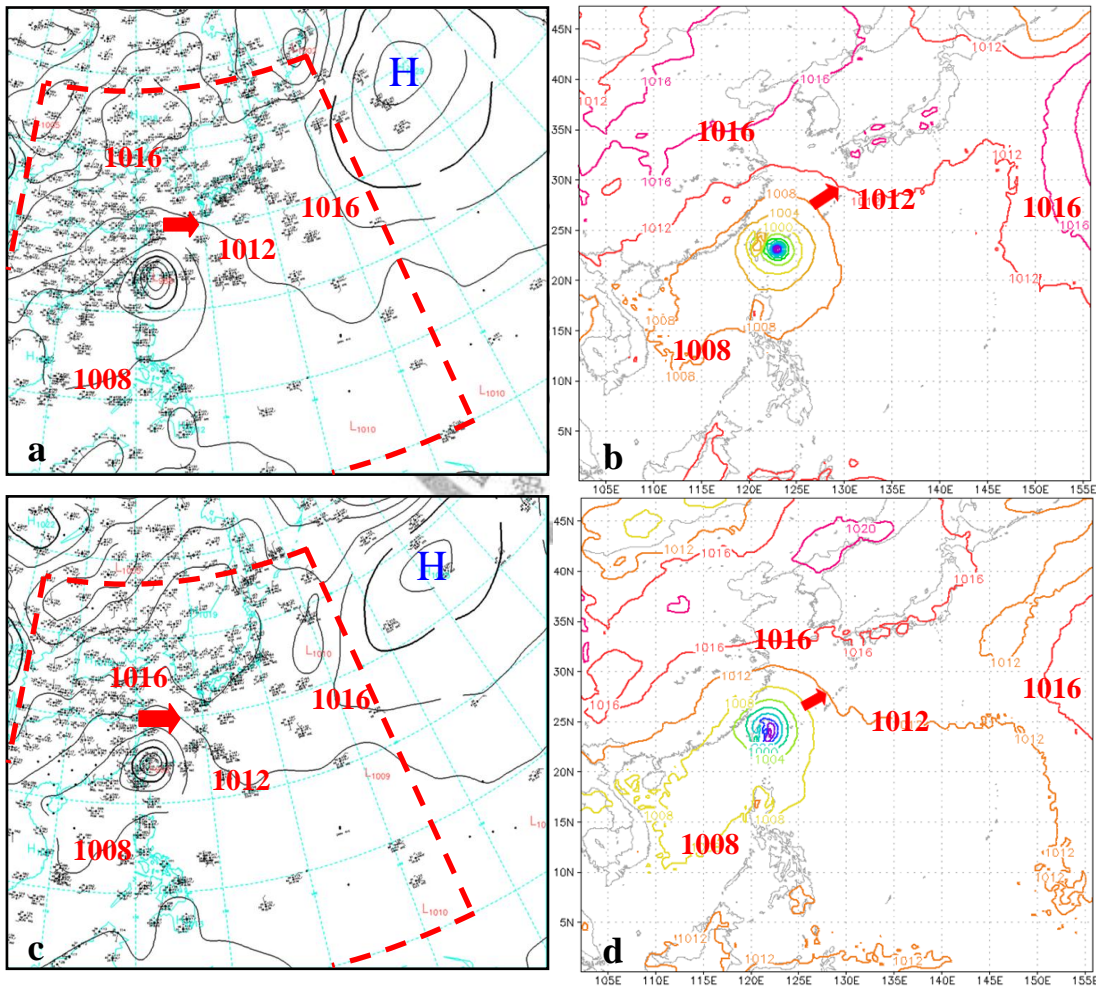


圖 3-10 分析(左)和模擬(右)之地面天氣圖, 等值線間距為 4 hPa, 左圖紅色虛線圍繞區域對應於右圖之網域範圍, 紅色箭頭為副熱帶高壓西側 1012 hPa 等值線的位置, 時間為 (a) 9月13日0000 UTC、(b) 同(a)、(c) 9月14日0000 UTC、(d) 同(c)。

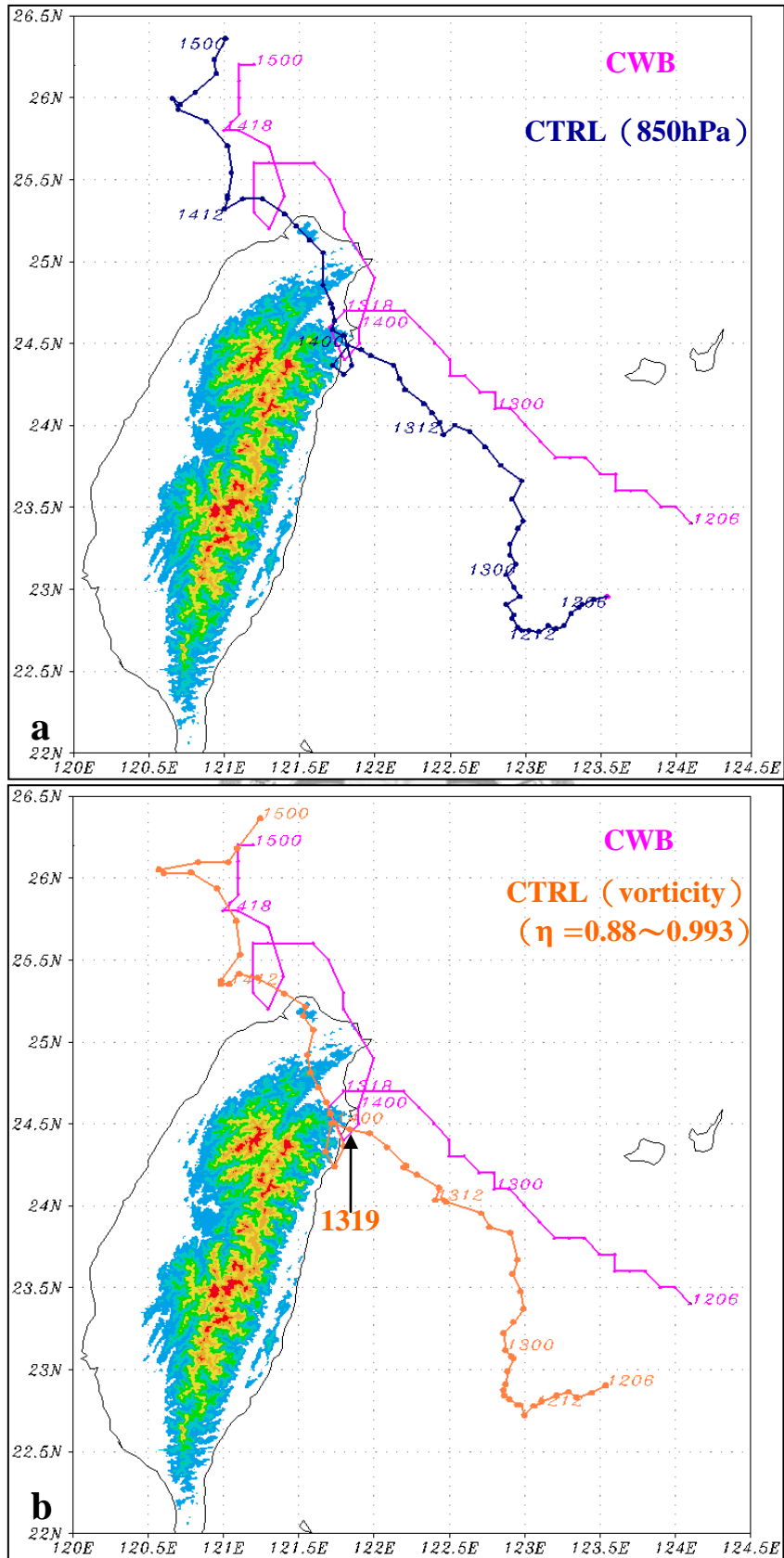


圖 3-11 辛樂克颱風 CWB 逐時定位資料 (粉紅色) 與模式控制組 (a) 850 hPa 逐時環流中心路徑 (藍色)、(b) $\eta = 0.88 \sim 0.993$ ，約 880~990 hPa 之逐時平均渦度中心路徑 (橘色)。(時間：9 月 12 日 0600 UTC~15 日 0000 UTC)

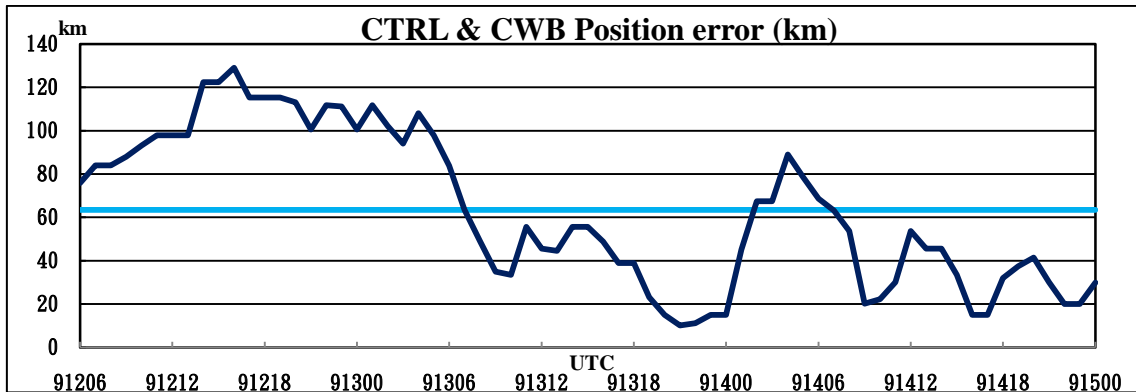


圖 3-12 辛樂克颱風模擬之 850 hPa 環流中心位置誤差 (相對於 CWB 颱風中心定位)，單位為 km，橫軸 91206 表 9 月 12 日 0600 UTC；模擬 (觀測) 之打轉時間為 13 日 2000 UTC~14 日 0000 UTC (13 日 1800 UTC~14 日 0000 UTC)。

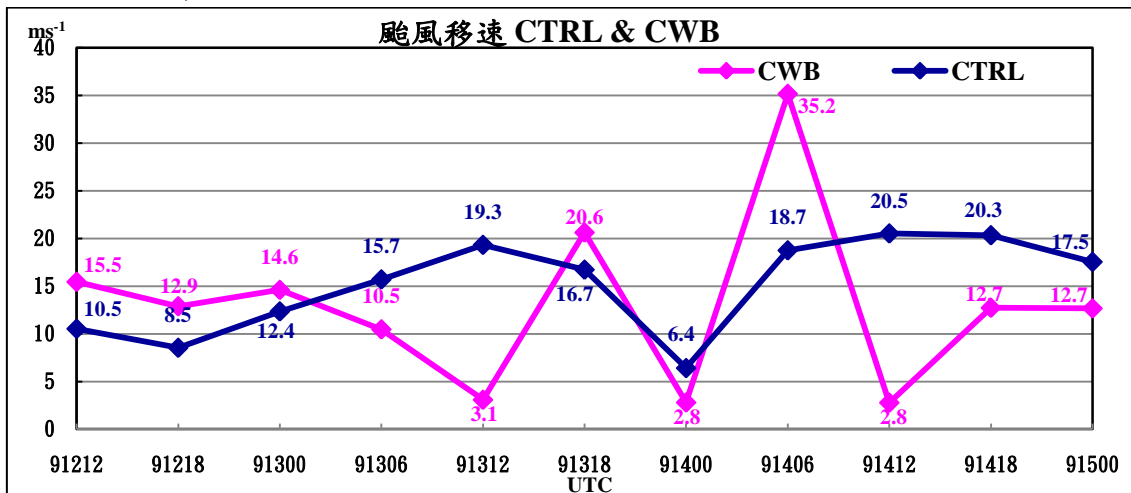


圖 3-13 辛樂克颱風模擬 850 hPa 環流中心 (藍色) 與 CWB 路徑資料之移速 (粉紅色)，單位為 ms^{-1} ，圖中橫軸 91212 所對應之縱軸數值代表 9 月 12 日 0600~1200 UTC 之移速；模擬 (觀測) 之打轉時間為 13 日 2000 UTC~14 日 0000 UTC (13 日 1800 UTC~14 日 0000 UTC)。

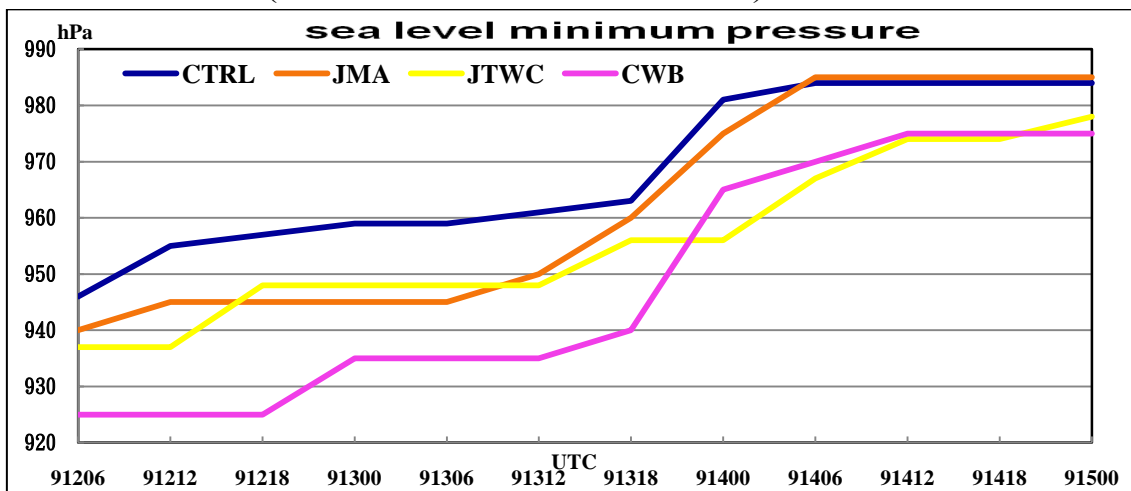


圖 3-14 辛樂克颱風控制組模擬結果 (藍色)、日本氣象廳 (橘色)、美國 JTWC Best Track (黃色) 和 CWB (粉紅色) 之中心最低氣壓 (hPa)，橫軸 91206 表 9 月 12 日 0600 UTC。

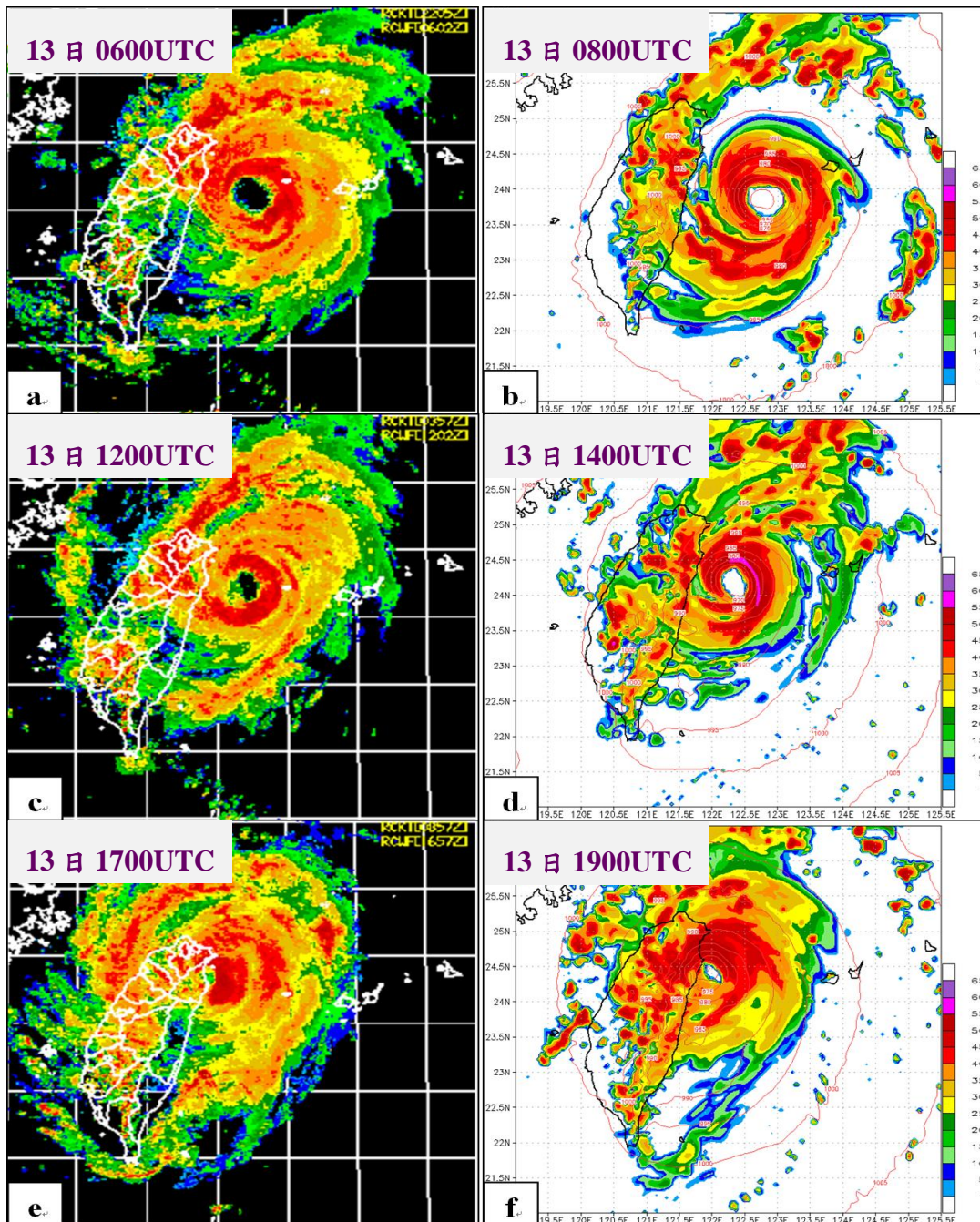
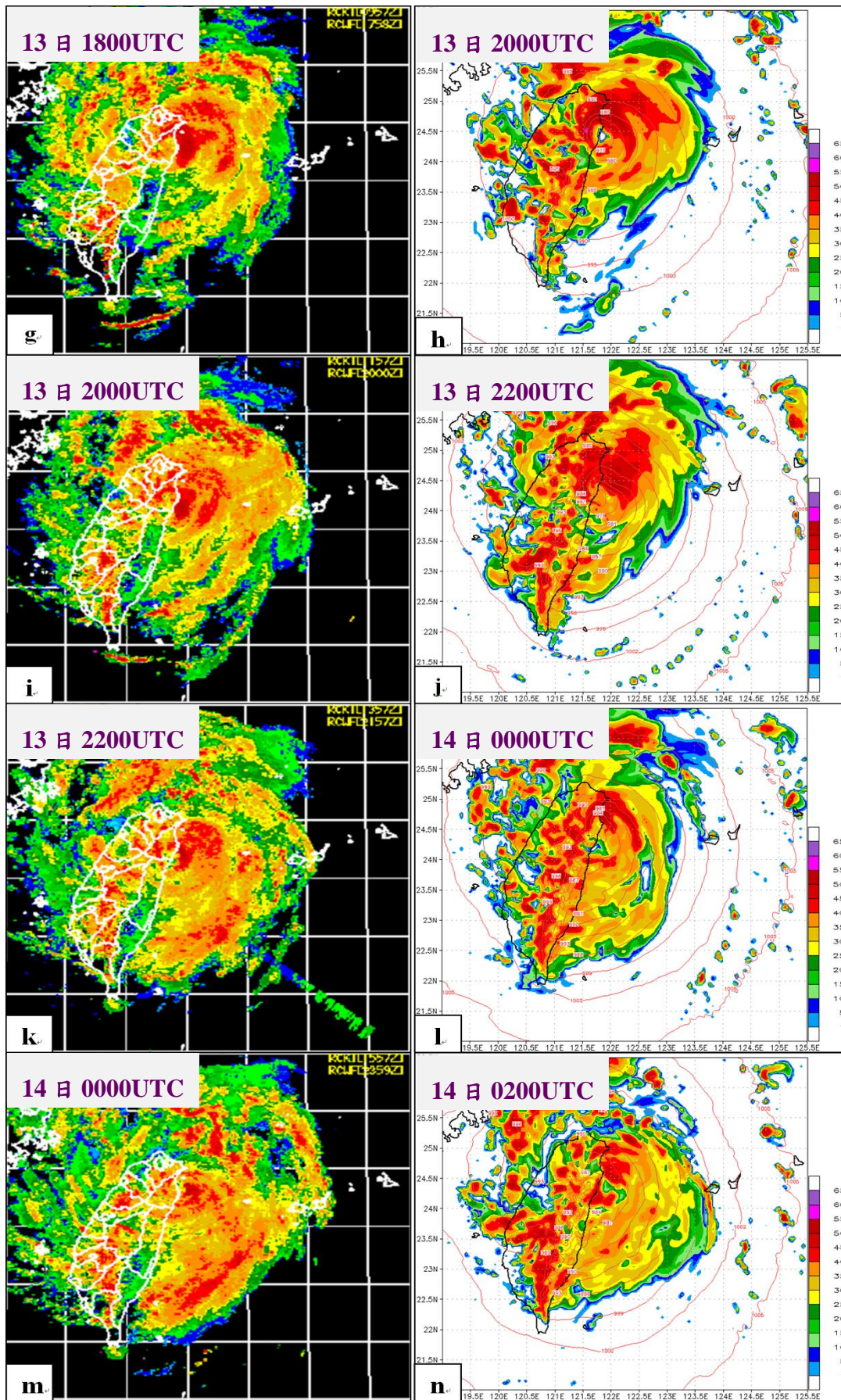


圖 3-15 雷達回波圖 (dBZ) 模擬結果校驗，左圖為 CWB 合成雷達-CV 圖，右圖為與之對應的模擬雷達回波，模擬時間比觀測晚 2 hr (a) 13 日 0600 UTC、(b) 13 日 0800 UTC、(c) 13 日 1200 UTC、(d) 13 日 1400 UTC、(e) 13 日 1700 UTC、(f) 13 日 1900 UTC、(g) 13 日 1800 UTC、(h) 13 日 2000 UTC、(i) 13 日 2000 UTC、(j) 13 日 2200 UTC、(k) 13 日 2200 UTC、(l) 14 日 0000 UTC、(m) 14 日 0000 UTC、(n) 14 日 0200 UTC。



續圖 3-15。

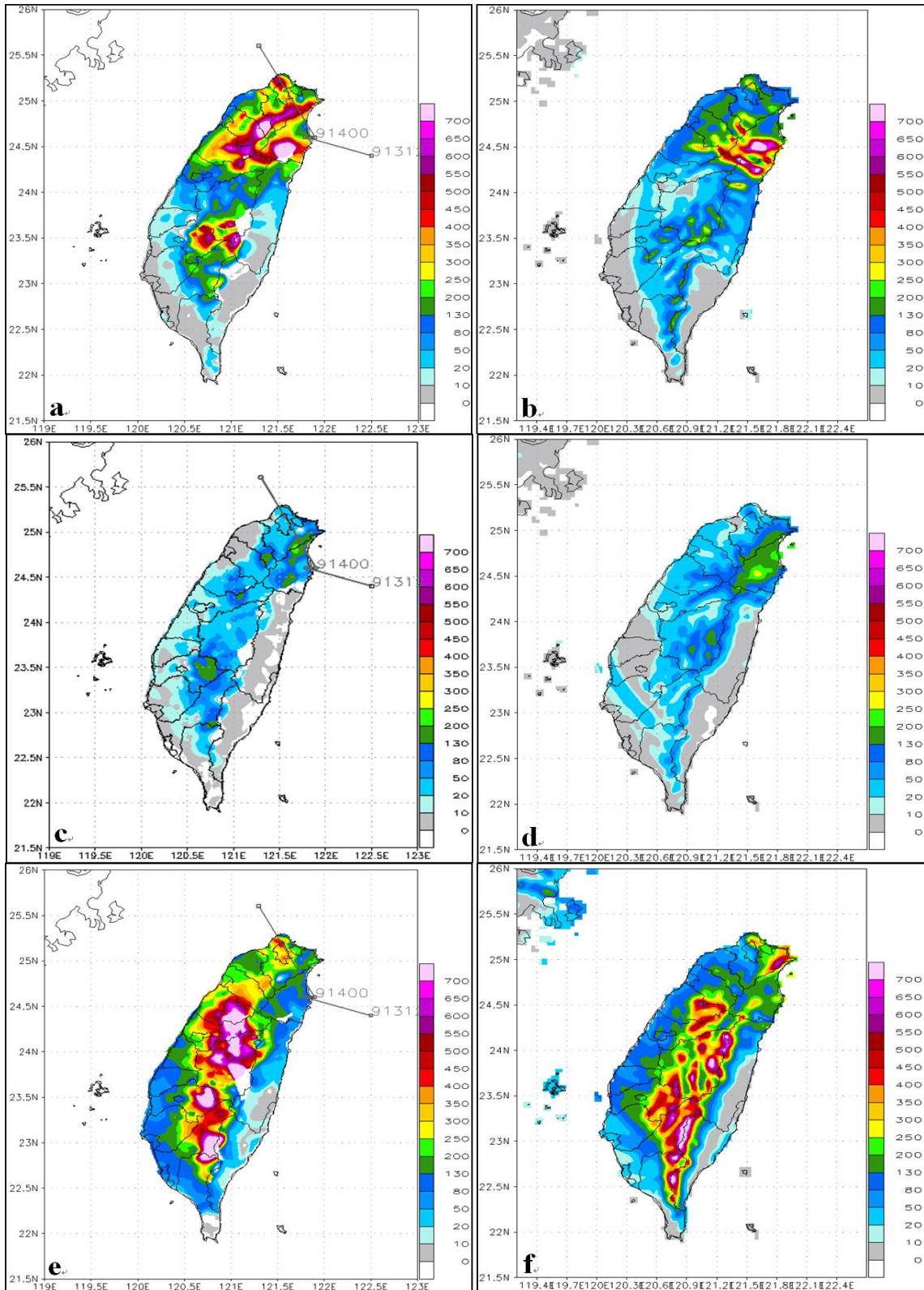
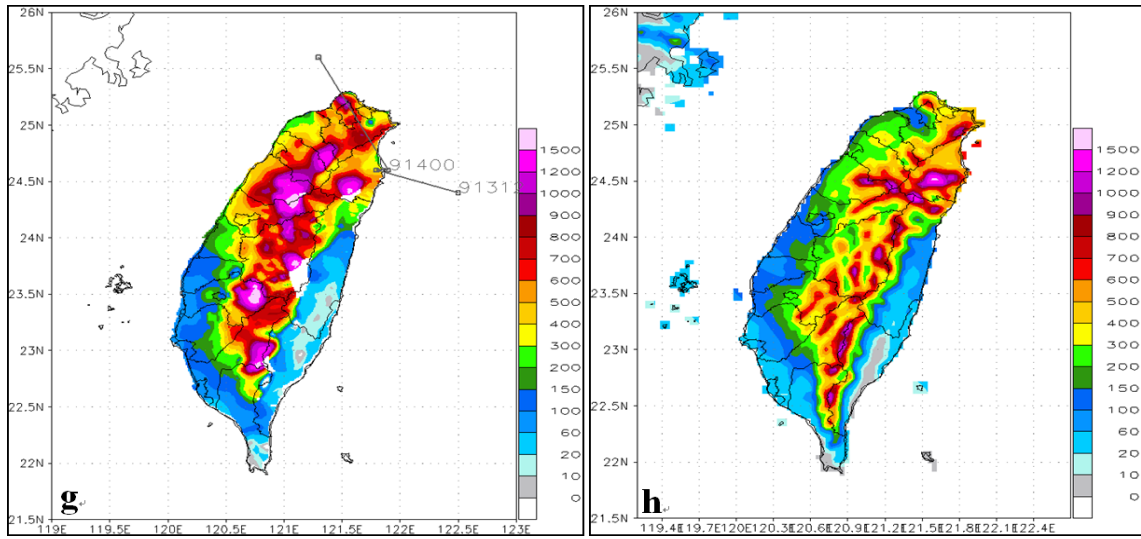


圖 3-16 辛樂克颱風累積雨量圖 (mm) 模擬結果校驗，左圖為 CWB 觀測資料，右圖為對應時間模式模擬結果(a)登陸前 41 hr(09120000~09131700 UTC)、(b)同(a)、(c)中心登陸期間 4 hr (09131700~09132100 UTC)、(d)同(c)、(e)出海後 27 hr (09132100~09150000 UTC)、(f)同(e)、(g)侵台期間 (09120000~09150000 UTC) 總雨量、(h)同(g)。



續圖 3-16。

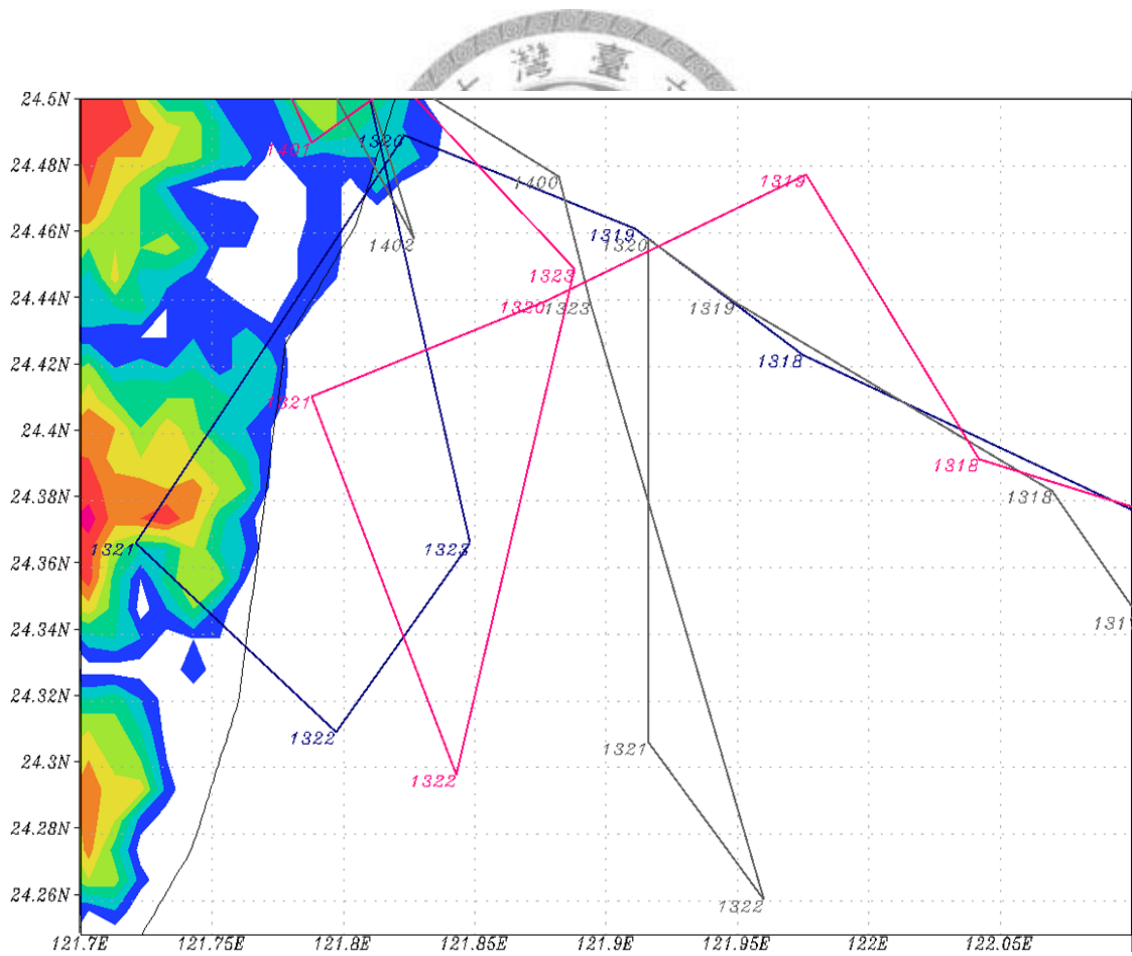


圖 4-1 控制組模擬之不同高度層逐時環流中心路徑圖，藍色、粉紅色和灰色線條依序為 850、700 和 500 hPa 層；圖中數字代表時間，如：1318 代表 13 日 1800 UTC；經緯度範圍：121.7~122.1°N、24.25~24.5°E。

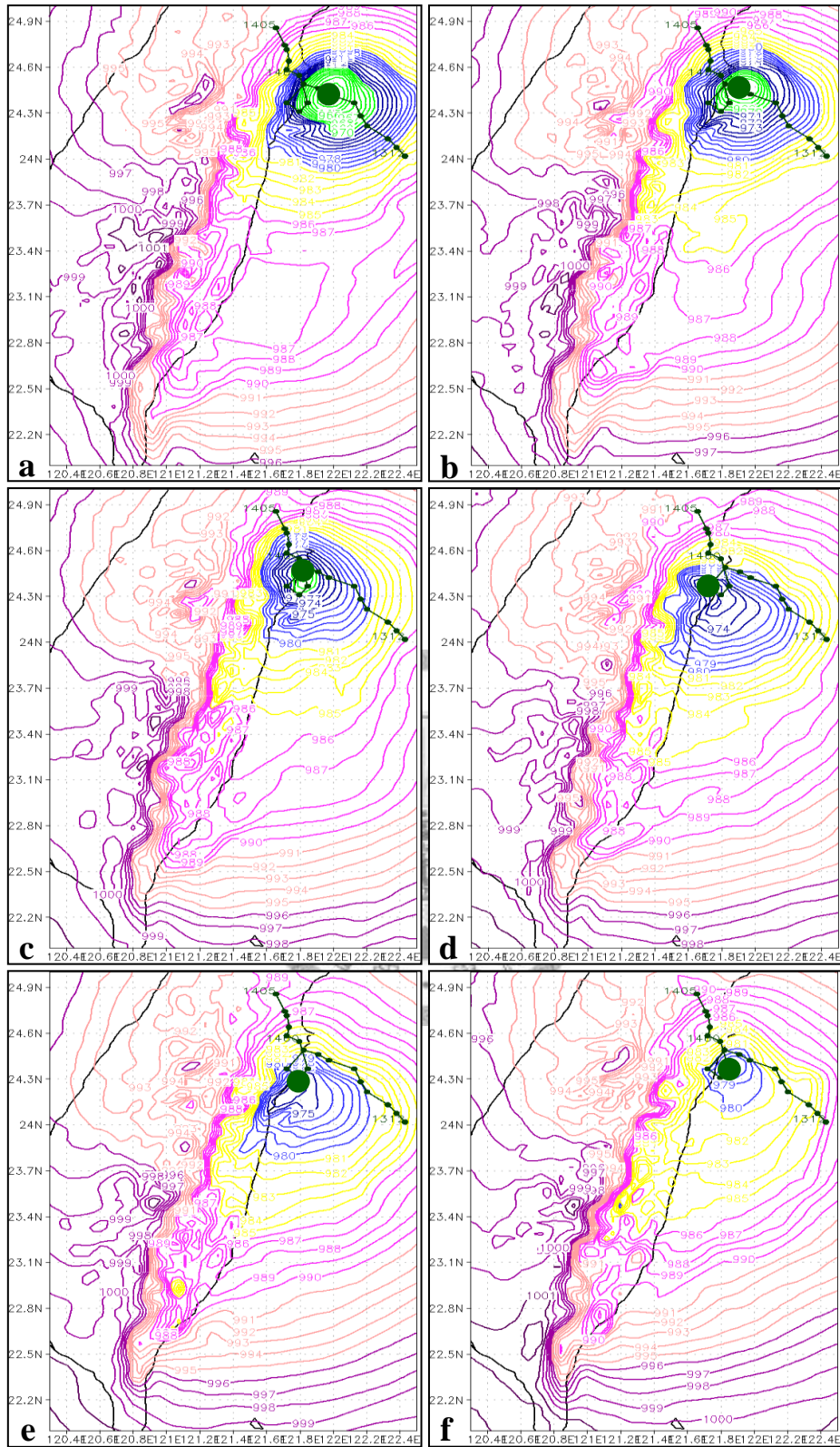


圖 4-2 控制組模擬之海平面氣壓場（等值線間距為 1 hPa），綠色線條和圓點（●）分別為模擬颱風 850 hPa 環流中心之路徑與位置，時間為 13 日 (a) 1800 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC、(d) 2100 UTC、(e) 2200 UTC、(f) 2300 UTC。

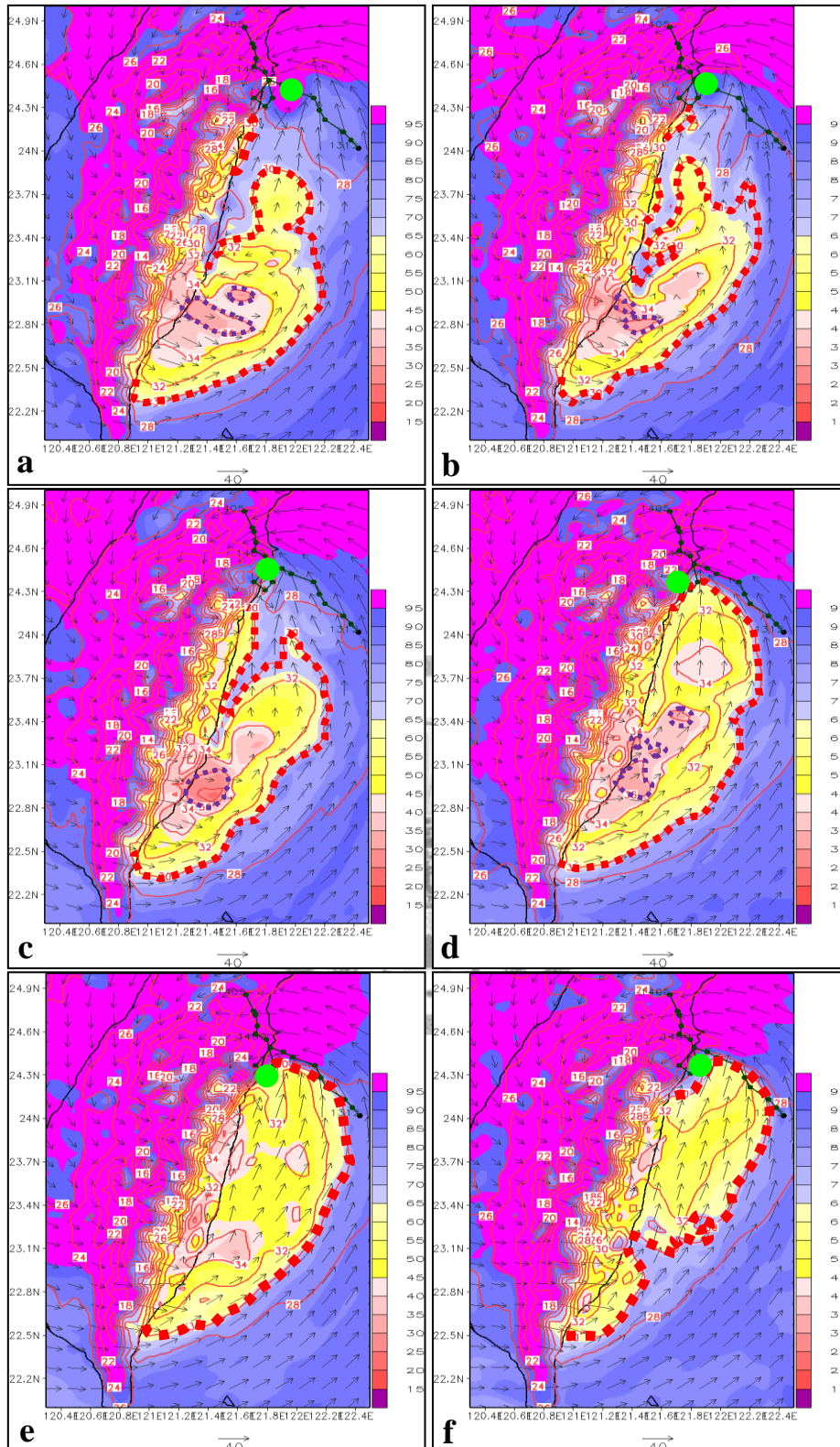


圖 4-3 控制組模擬之近地層 ($\eta = 0.993$, 約 990 hPa) 水平風場向量 (ms^{-1} , 箭頭)、溫度 (等值線, 間距為 2°C) 和相對溼度 (陰影), 綠色線條、圓點 (●)、紅和紫虛線依序為模擬颱風 850 hPa 環流中心之路徑、位置、溫度達 30 和 36°C 範圍, 時間為 13 日 (a) 1800 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC、(d) 2100 UTC、(e) 2200 UTC、(f) 2300 UTC。

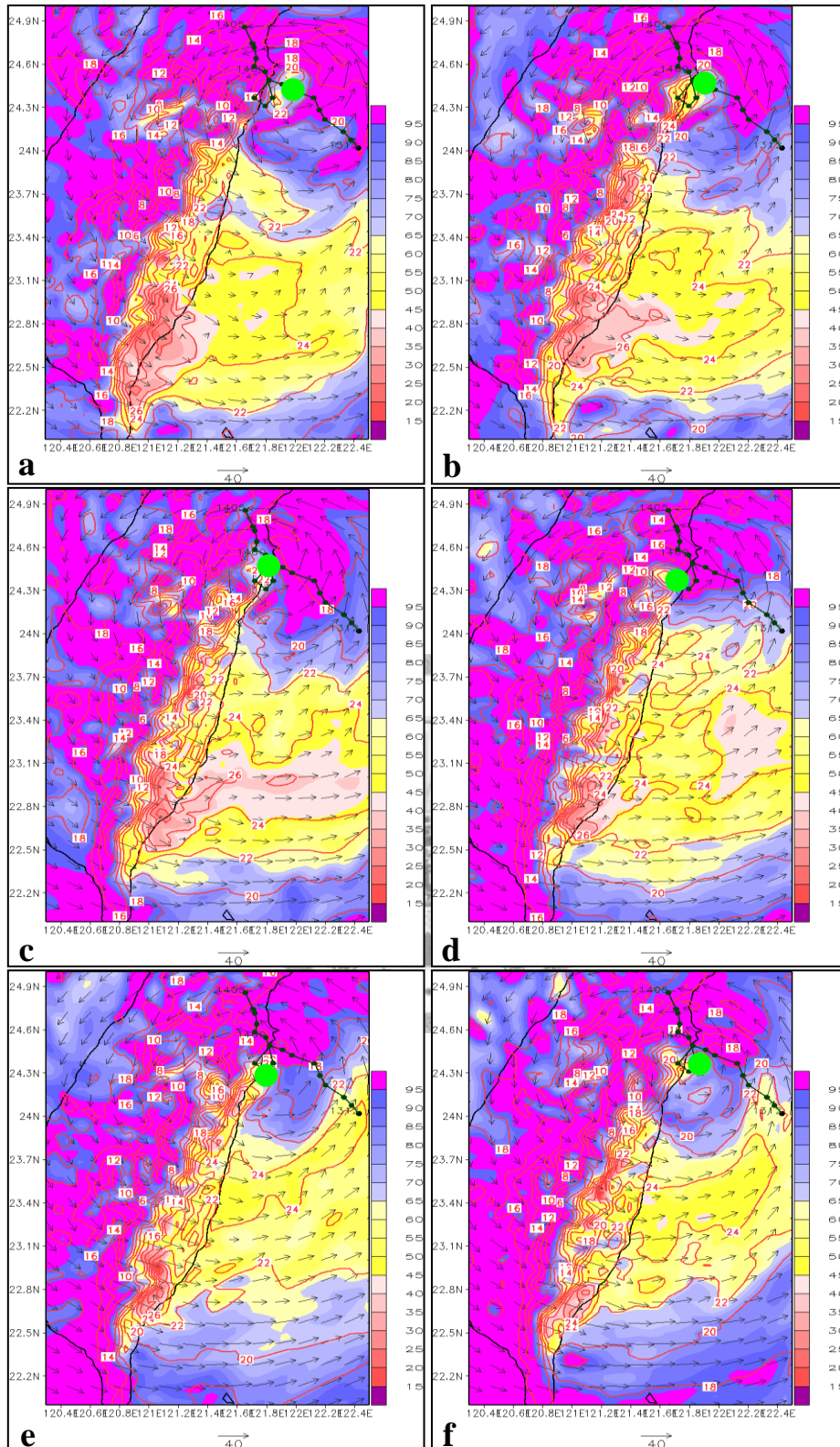


圖 4-4 同圖 4-3，但為 $\eta = 0.8362$ (約 850 hPa)。

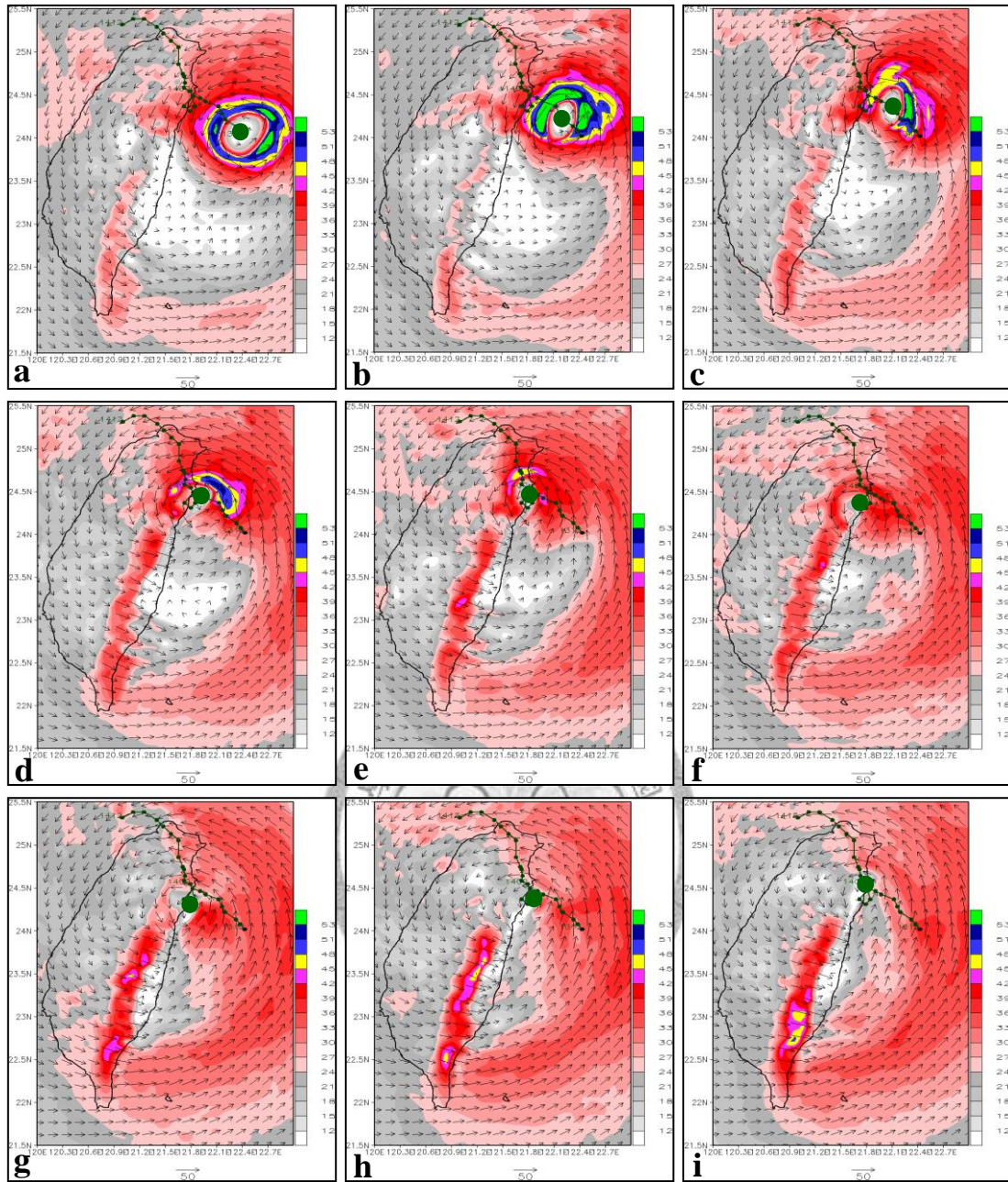


圖 4-5 控制組模擬之低層($\eta = 0.88 \sim 0.993$, 約 880~990 hPa)平均水平風速(ms^{-1} , 陰影)和風場向量(箭頭),綠色線條和圓點(●)分別為模擬颱風 850 hPa 環流中心之路徑和位置,時間為 13 日 (a) 1300 UTC、(b) 1500 UTC、(c) 1700 UTC、(d) 1900 UTC、(e) 2000 UTC、(f) 2100 UTC、(g) 2200 UTC、(h) 2300 UTC、(i) 14 日 0000 UTC。

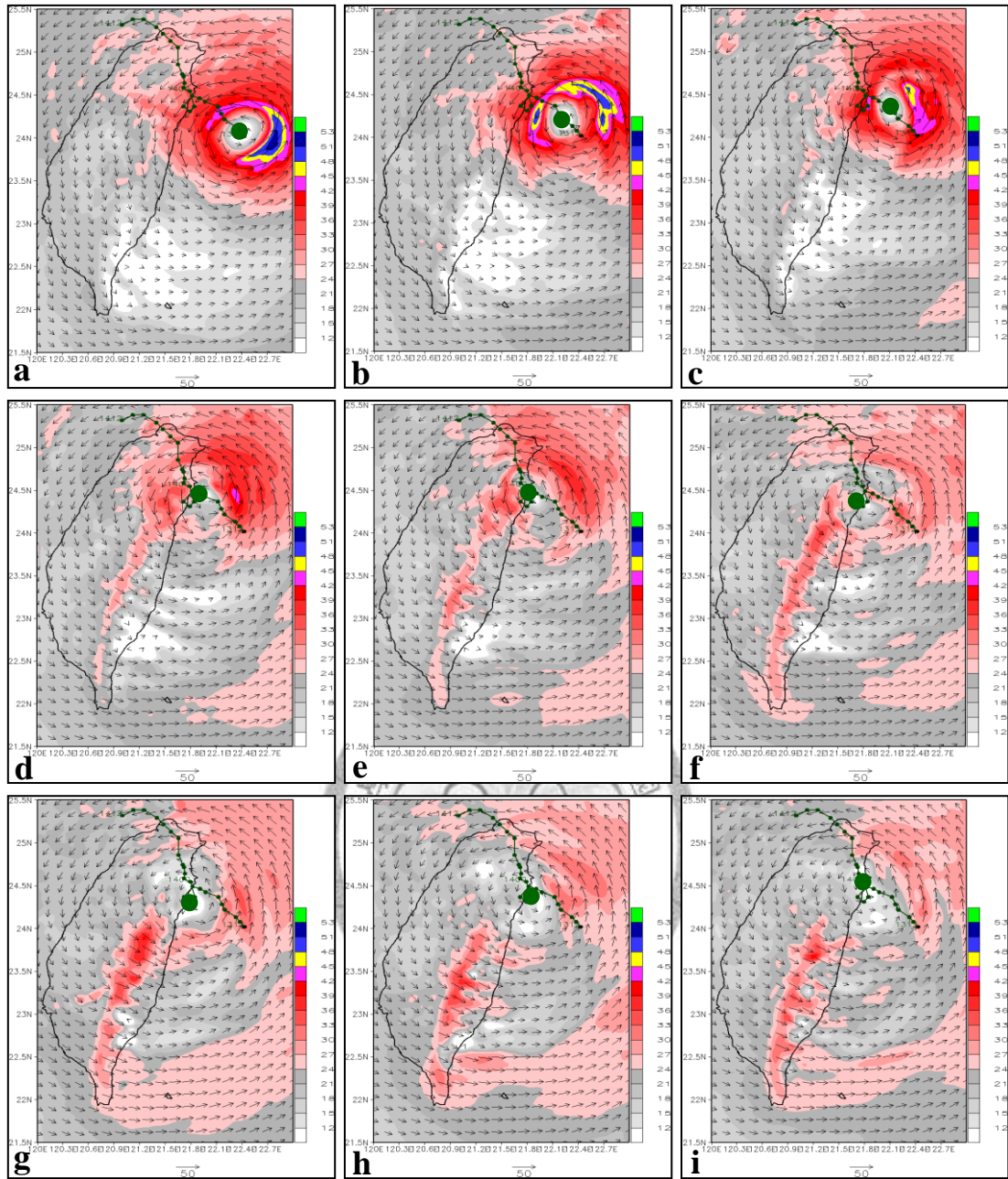


圖 4-6 同圖 4-5，但為 $\eta = 0.6277 \sim 0.8362$ (約 640~820 hPa)。

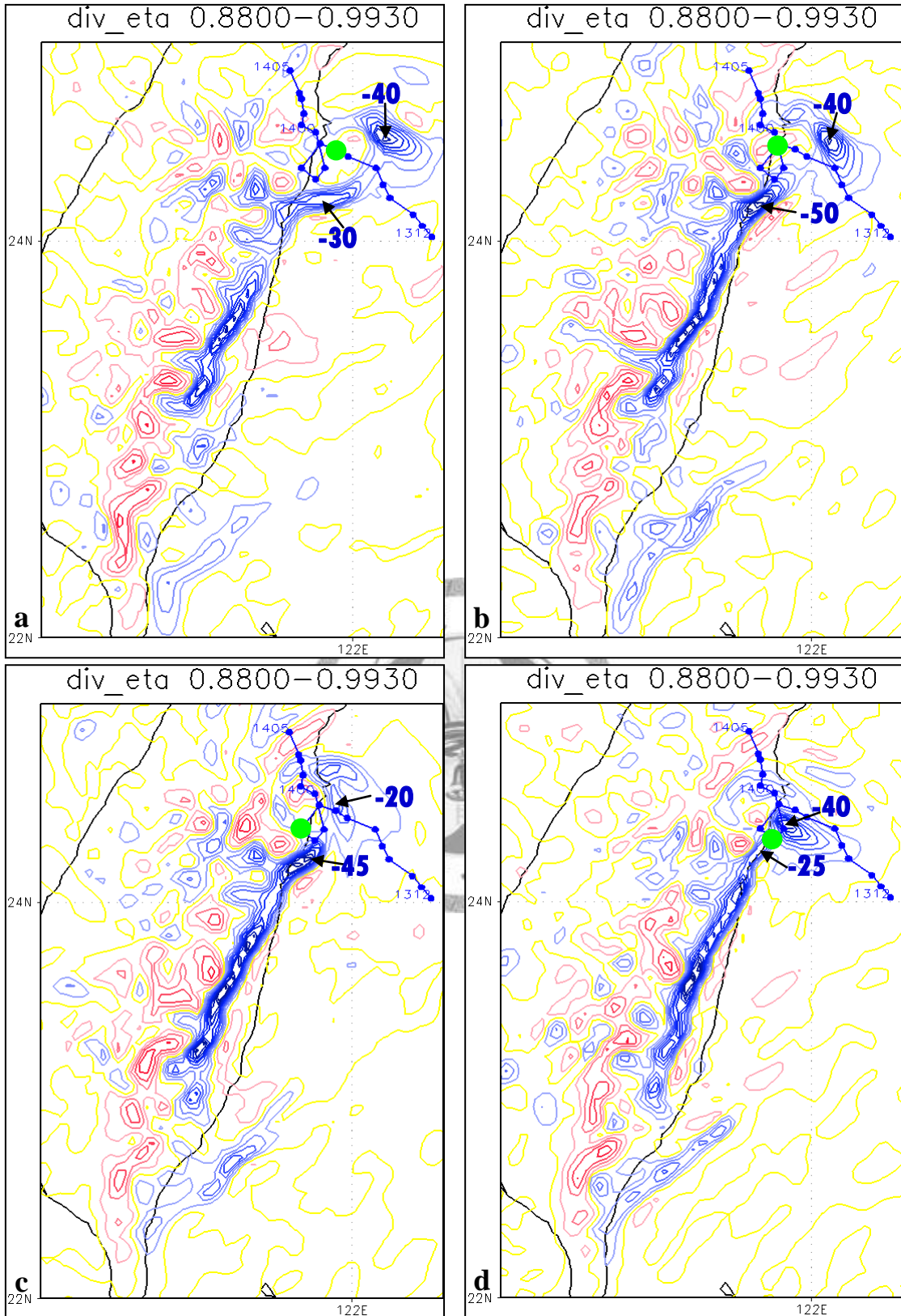


圖 4-7 控制組模擬之低層 ($\eta=0.88\sim 0.993$, 約 880~990 hPa) 平均水平輻散場 (紅色為正值; 藍色為負值; 黃色為 0; 等值線間距為 $5\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), 藍色線條和綠色圓點 (●) 分別為模擬颱風 850 hPa 環流中心之路徑與位置, 時間為 13 日 (a) 1900 UTC、(b) 2000 UTC、(c) 2100 UTC、(d) 2200 UTC。

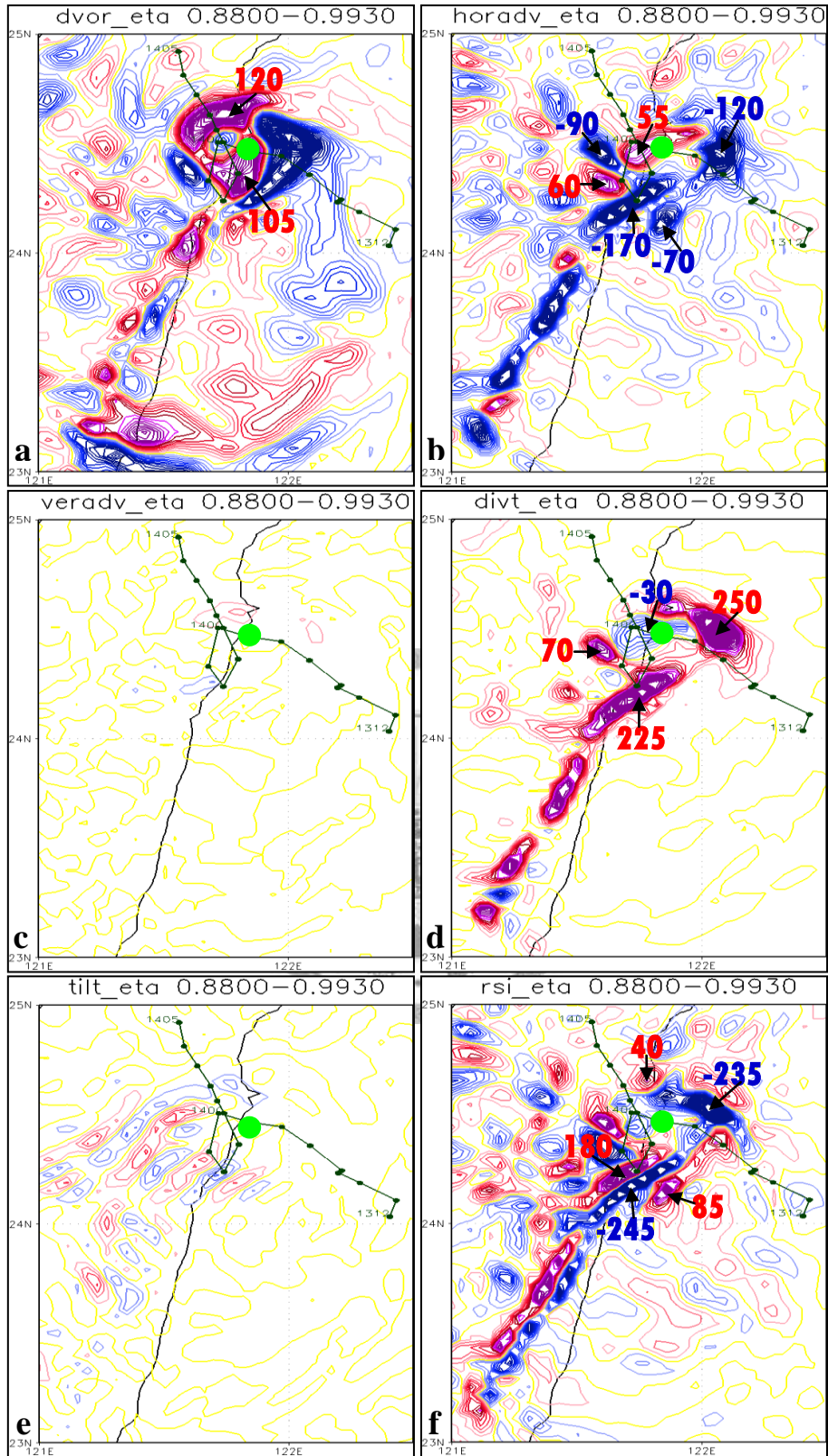


圖 4-8 模擬積分 43 hr (13 日 1900 UTC) 之低層 ($\eta=0.88\sim 0.993$, 約 880~990 hPa) 平均渦度收支, 紅和藍色各表正和負值, 黃色為 0, a 等值線間距為 $5\times 10^{-8} s^{-2}$, b~f 為 $5\times 10^{-7} s^{-2}$, 綠色線條和圓點 (●) 分別為模擬颱風之逐時平均渦度中心路徑與位置 (a) 局部渦度變化、(b) 水平平流項、(c) 垂直平流項、(d) 輻散項、(e) 扭轉項、(f) 剩餘項。

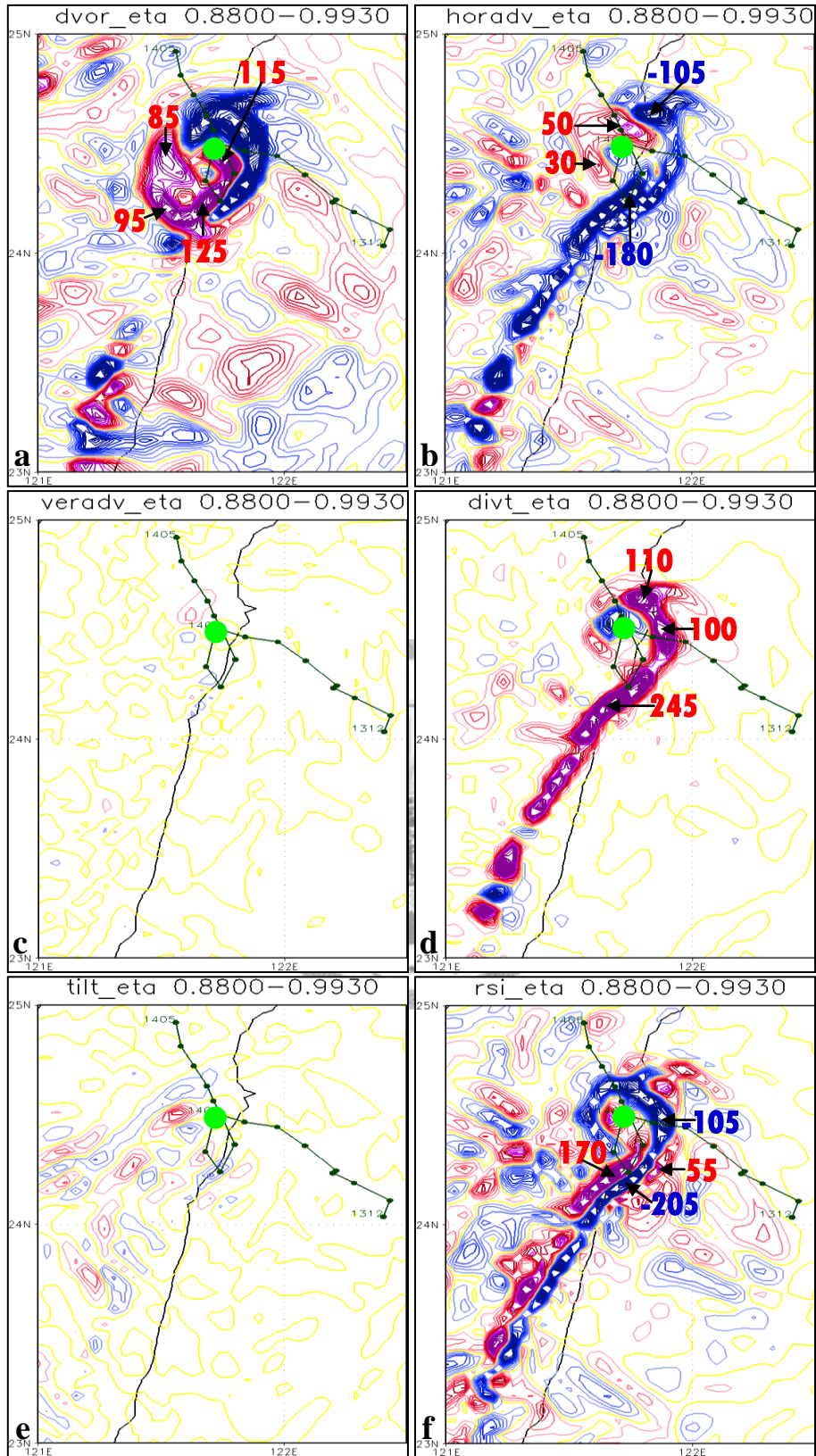


圖 4-9 同圖 4-8，但為積分 44 hr (13 日 2000 UTC)。

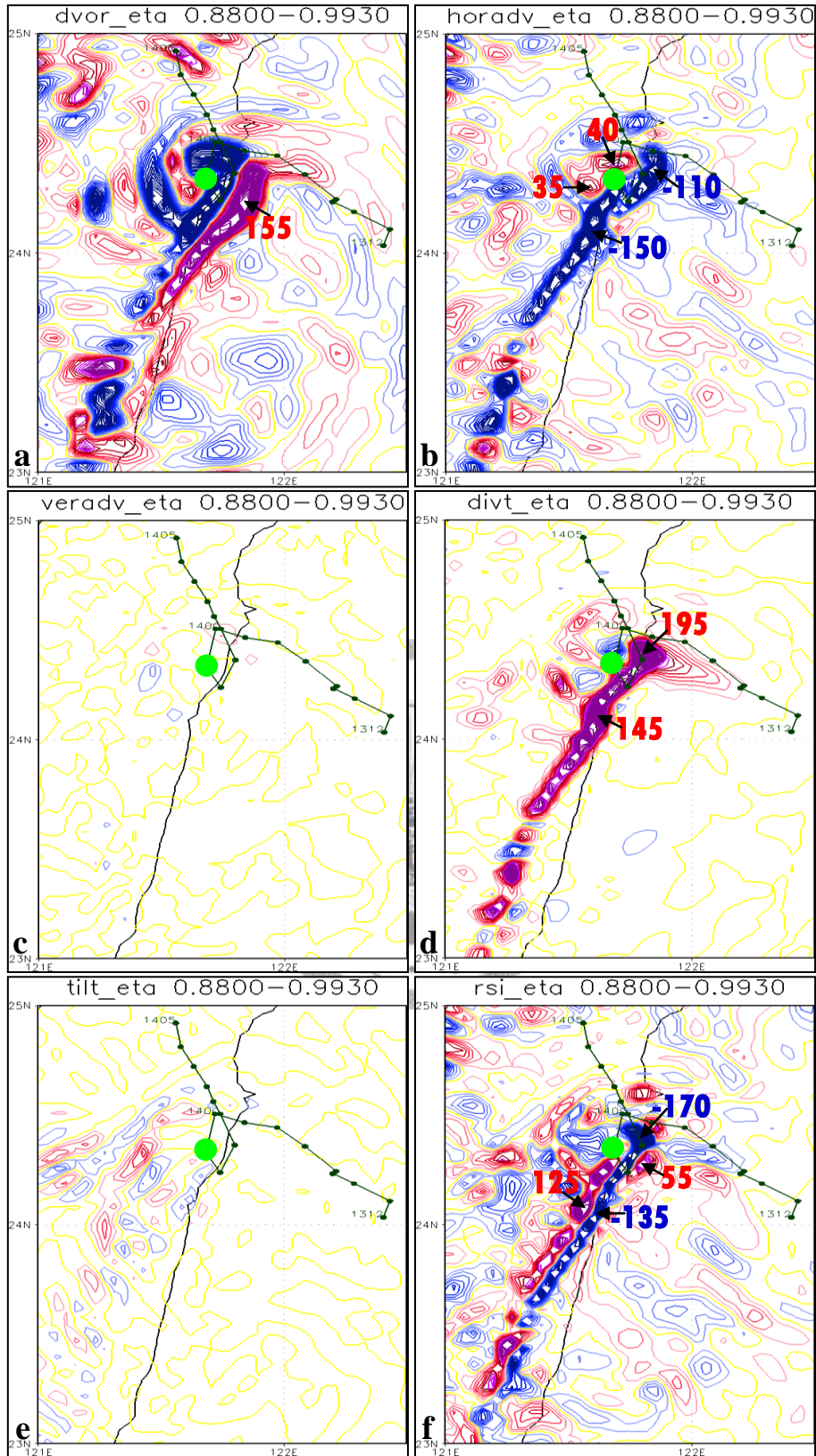


圖 4-10 同圖 4-8，但為積分 45 hr (13 日 2100 UTC)。

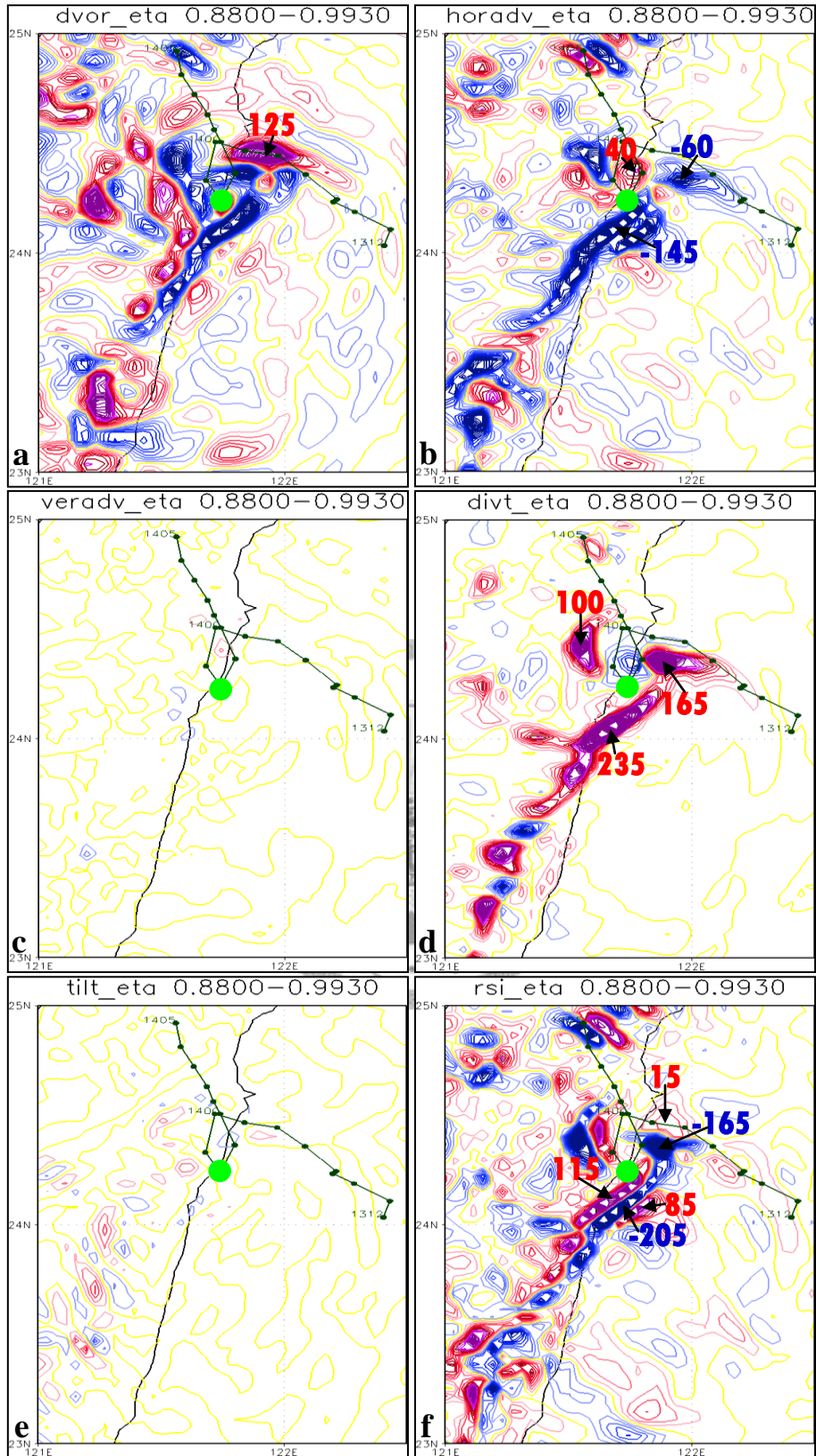


圖 4-11 同圖 4-8，但為積分 46 hr (13 日 2200 UTC)。

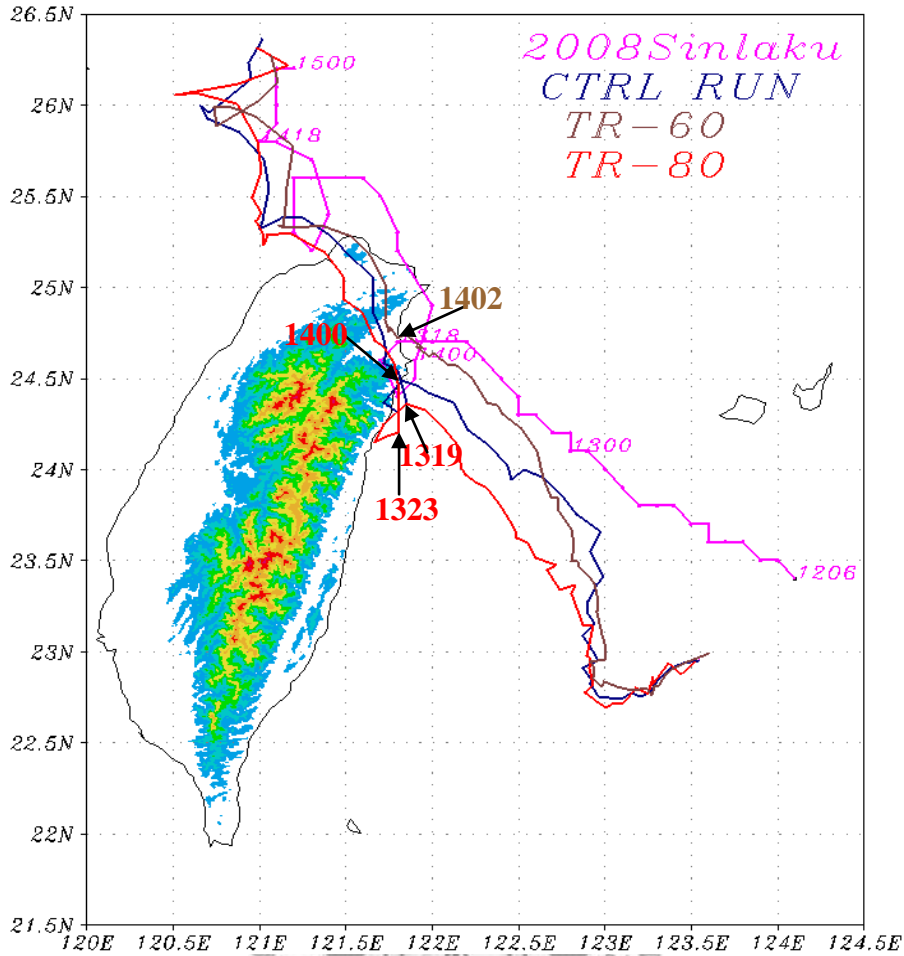


圖 4-12 控制組模擬之 850 hPa 環流中心逐時路徑(藍色、咖啡和紅色依序為 CTRL、TR-60 和 TR-80 實驗)與 CWB 逐時定位資料(粉紅色)。(時間：9 月 12 日 0600 UTC~15 日 0000 UTC)。

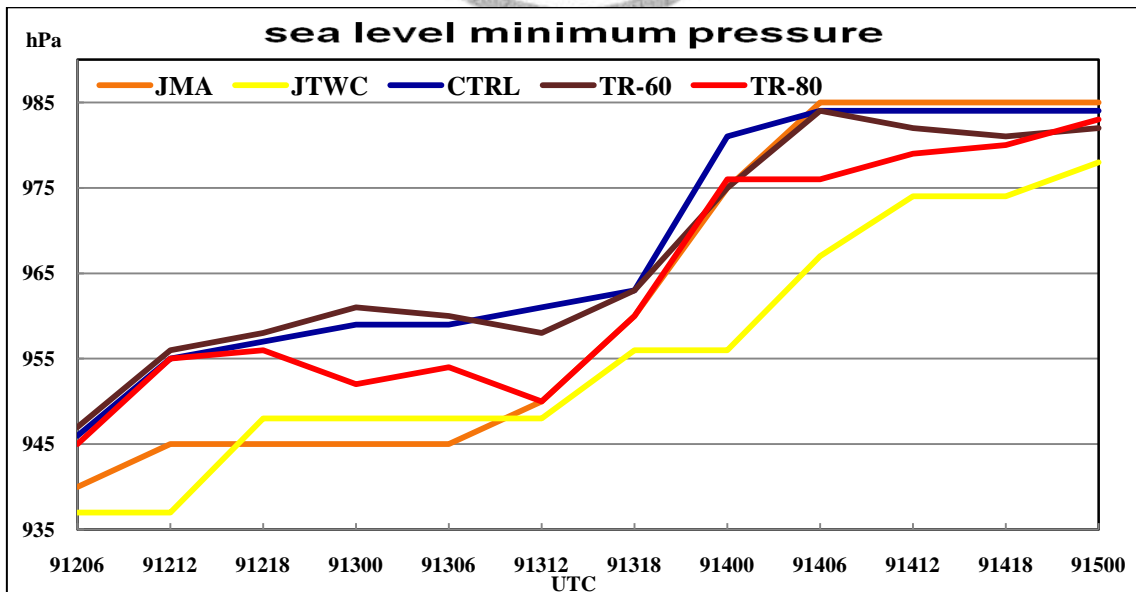


圖 4-13 辛樂克颱風中心最低氣壓時間序列，橘和黃色分別為 JMA 和美國 JTWC Best Track 之資料；藍、咖啡和紅色依序為 CTRL 實驗、TR-60 和 TR-80 之模式模擬結果。

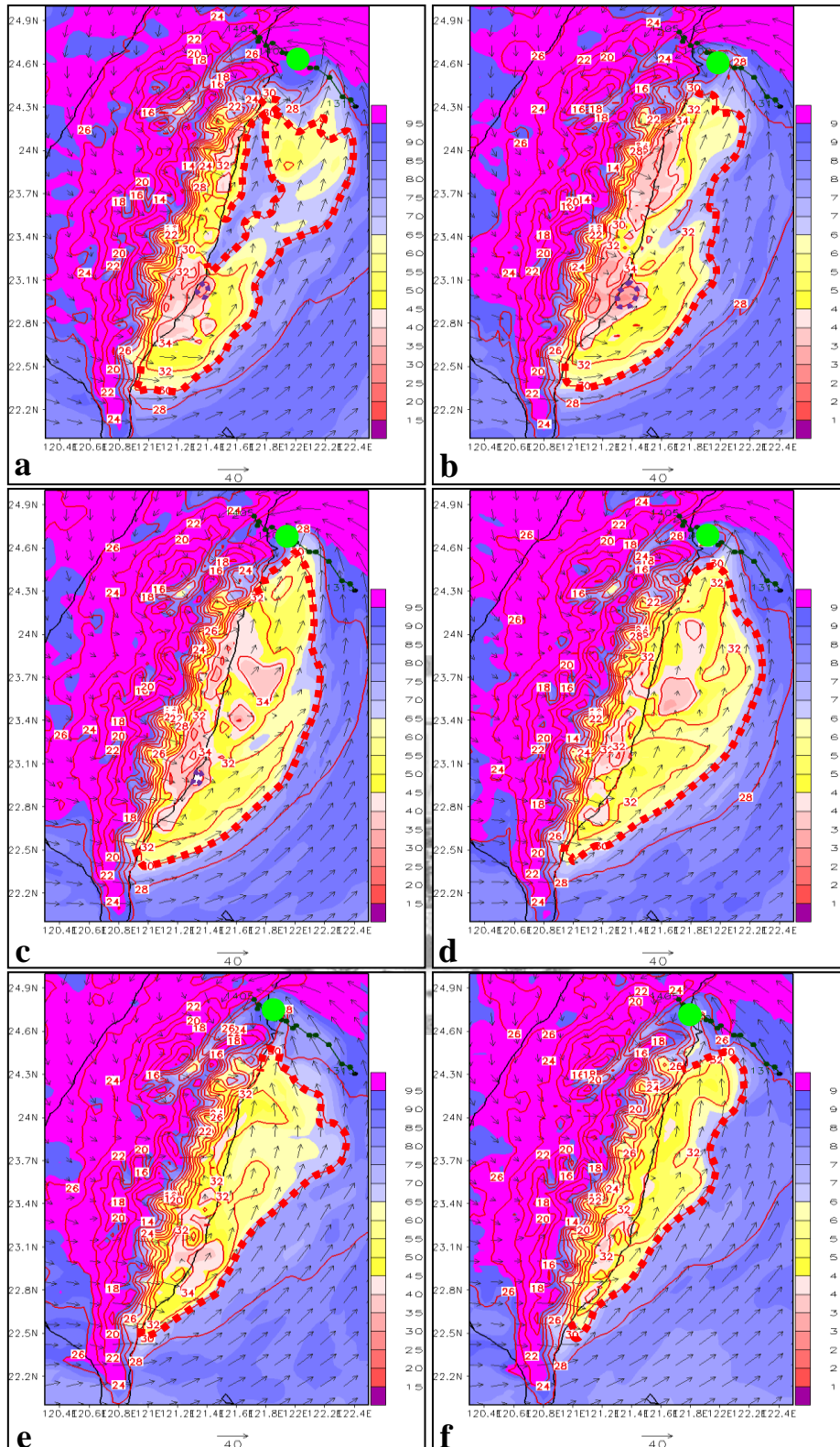


圖 4-14 同圖 4-3，但為實驗 TR-60，時間為 13 日 (a) 2100 UTC、(b) 2200 UTC、(c) 2300 UTC、(d) 14 日 0000 UTC、(e) 14 日 0100 UTC、(f) 14 日 0200 UTC。

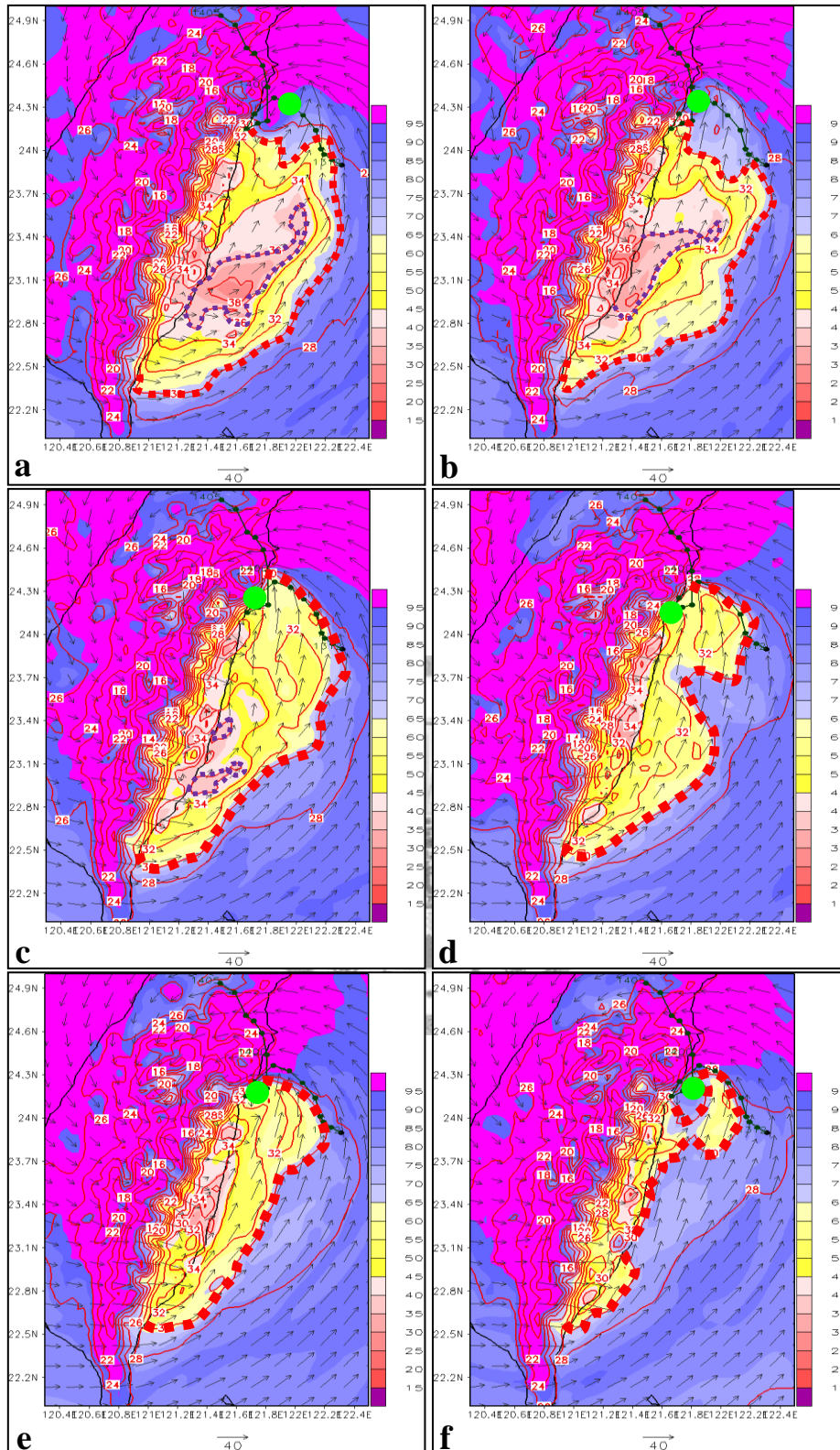


圖 4-15 同圖 4-3，但為實驗 TR-80，時間為 13 日 (a) 1800 UTC、(b) 1900 UTC、(c) 2000 UTC、(d) 2100 UTC、(e) 2200 UTC、(f) 2300 UTC。

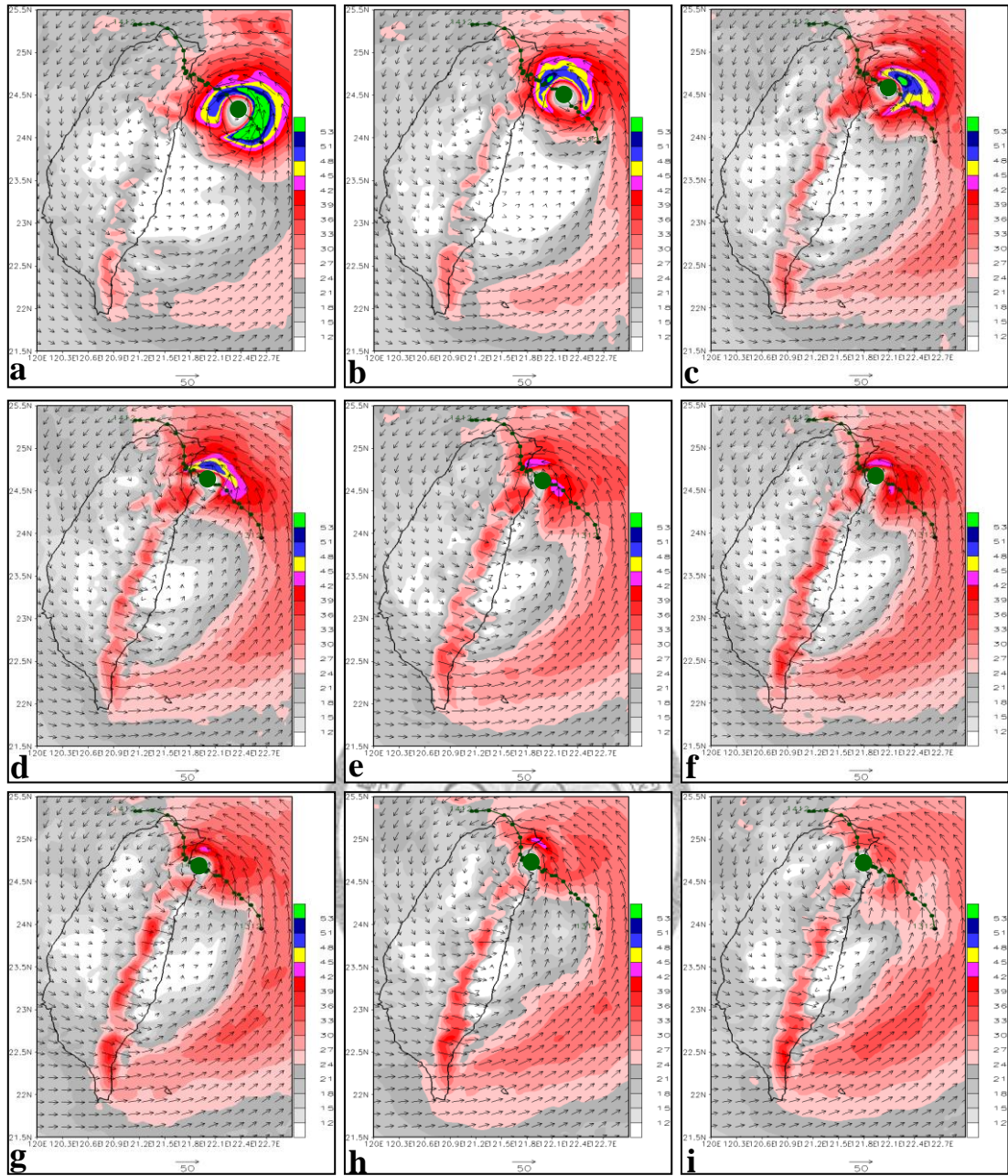


圖 4-16 同圖 4-5，但為實驗 TR-60，時間為 13 日 (a) 1600 UTC、(b) 1800 UTC、(c) 2000 UTC、(d) 2100 UTC、(e) 2200 UTC、(f) 2300 UTC、(g) 14 日 0000 UTC、(h) 14 日 0100 UTC、(i) 14 日 0200 UTC。

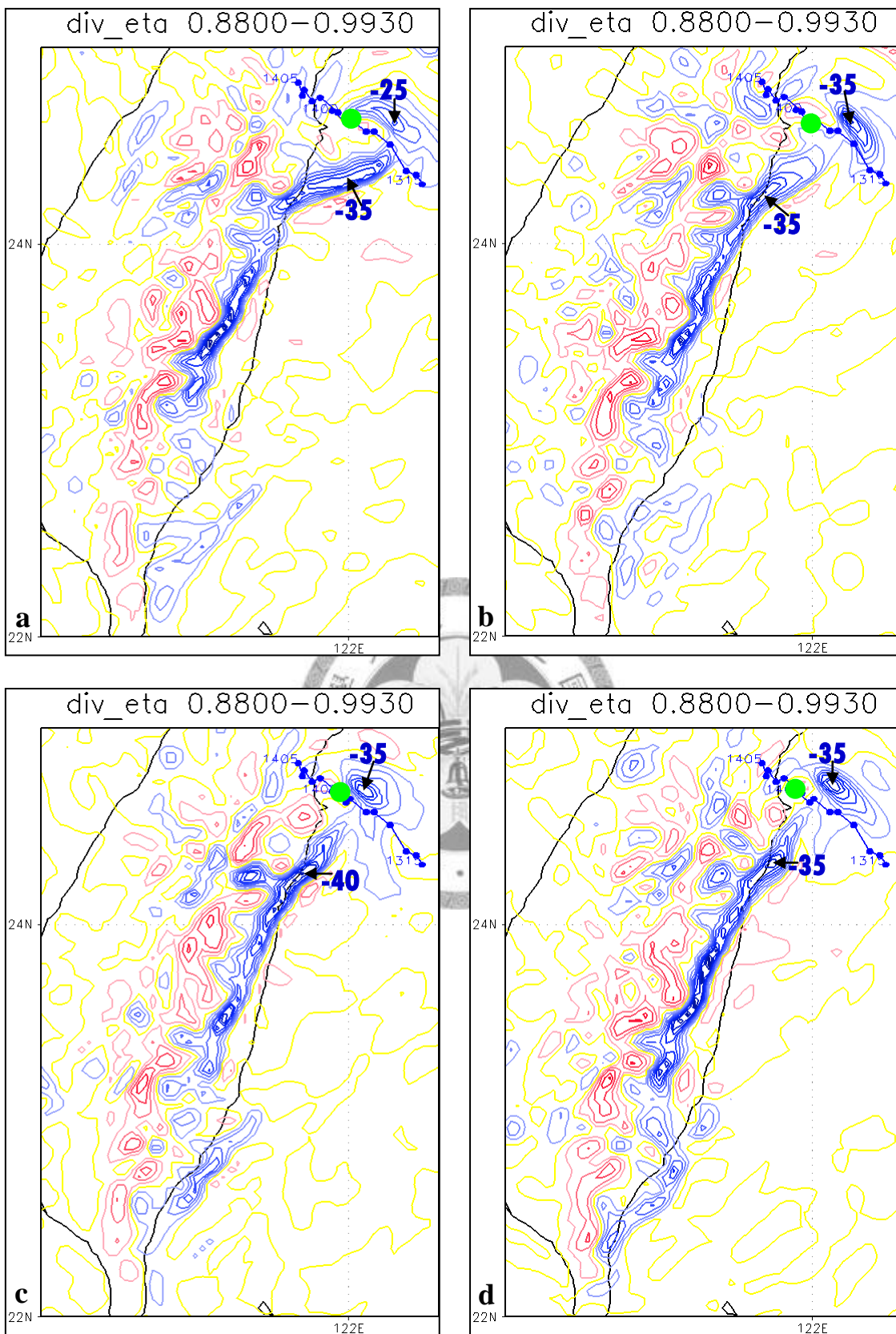


圖 4-17 同圖 4-7，但為實驗 TR-60，時間為 13 日 (a) 2100 UTC、(b) 2200 UTC、(c) 2300 UTC、(d) 14 日 0000 UTC。

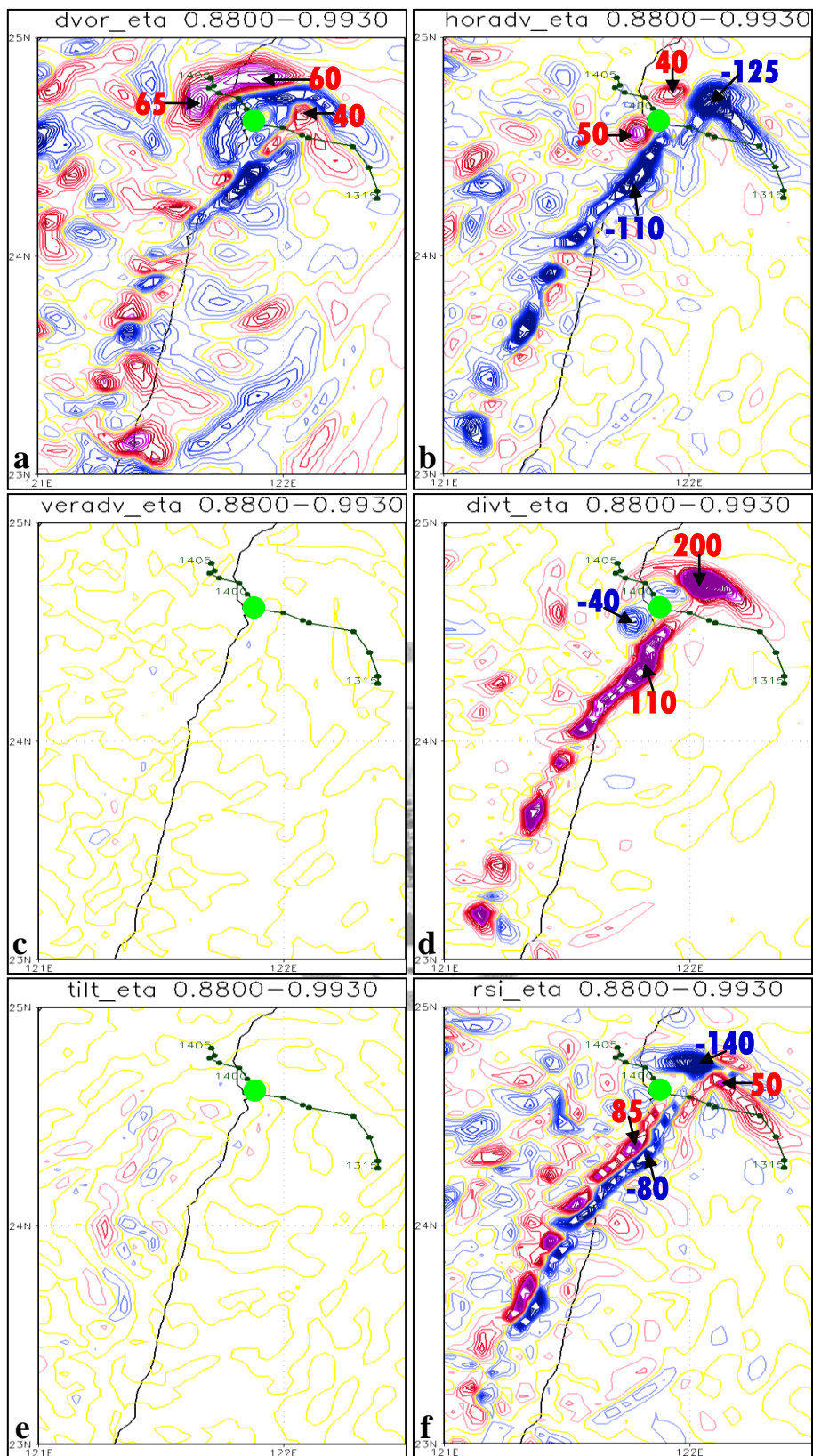


圖 4-18 同圖 4-8，但為實驗 TR-60 積分 47 hr (13 日 2300 UTC)。

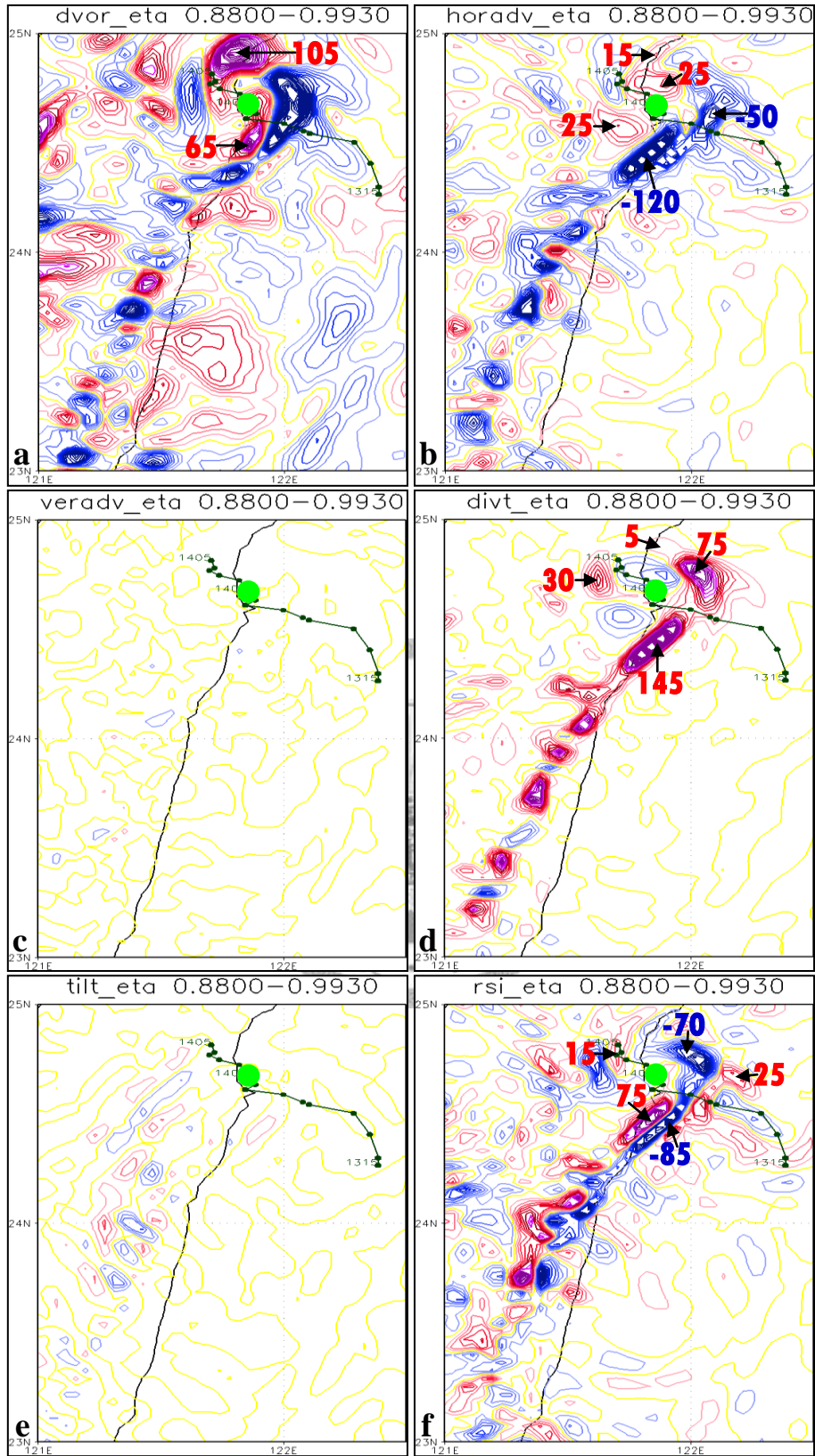


圖 4-19 同圖 4-8，但為實驗 TR-60 積分 48 hr (14 日 0000 UTC)。

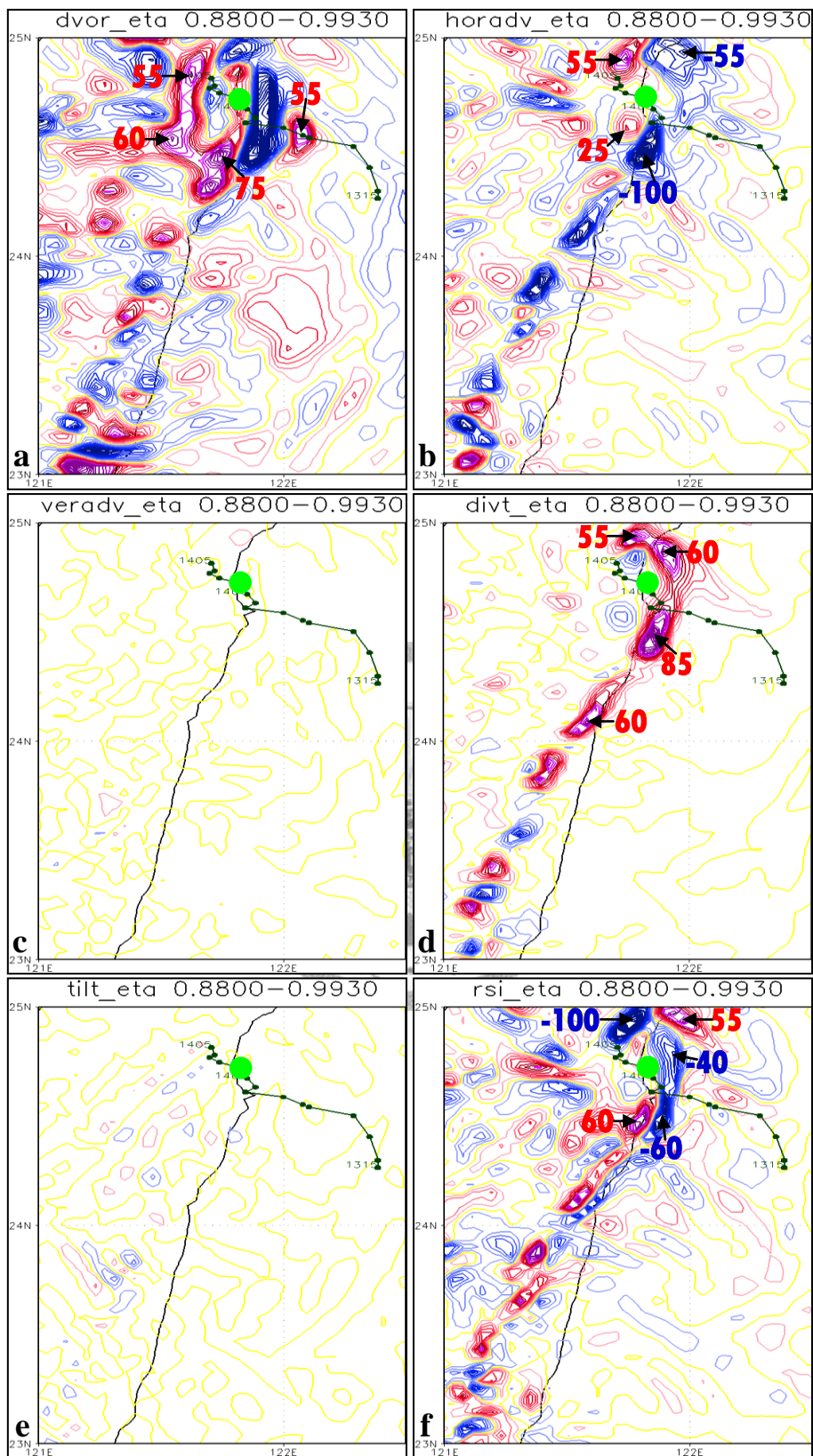


圖 4-20 同圖 4-8，但為實驗 TR-60 積分 49 hr (14 日 0100 UTC)。

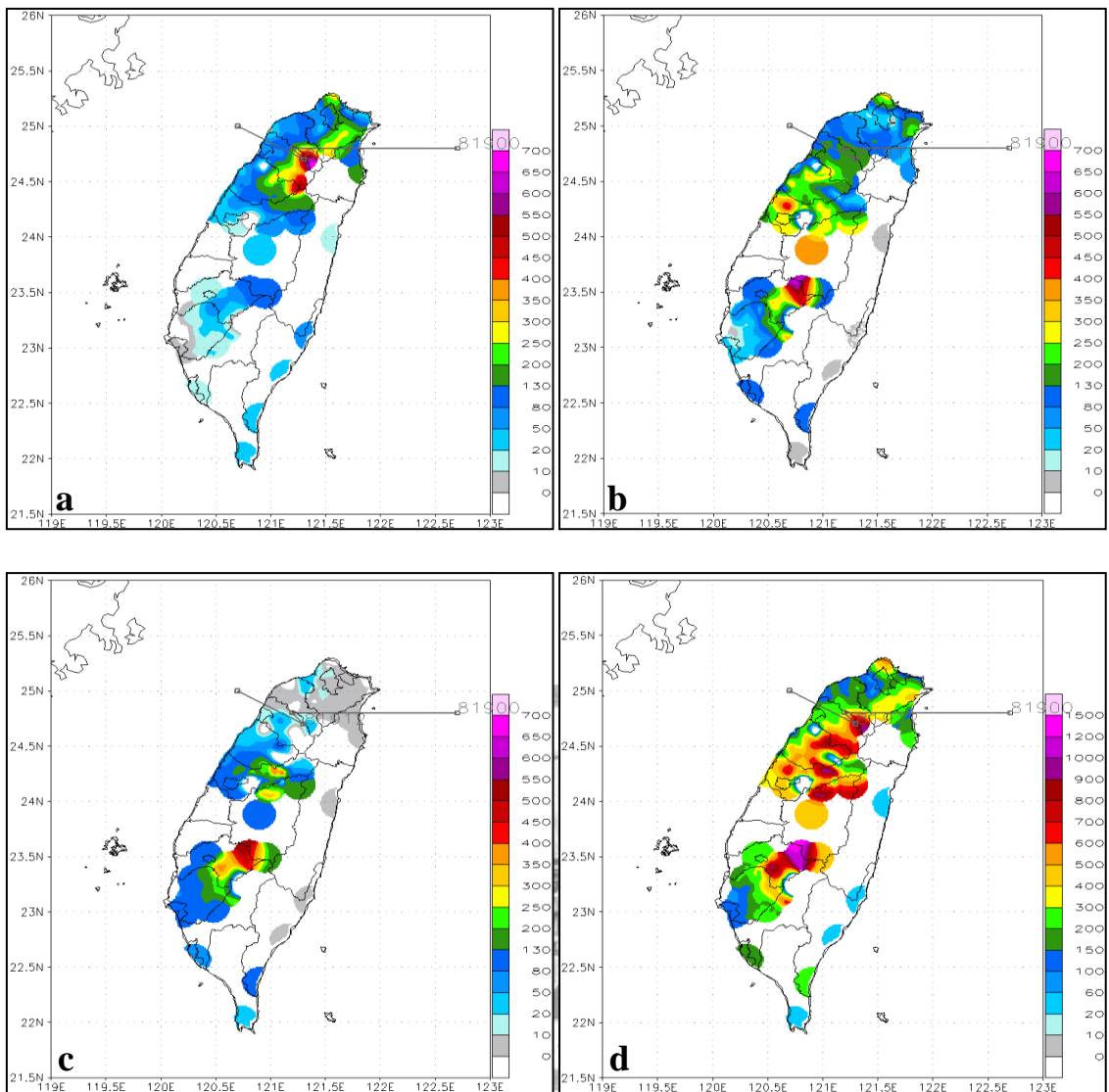


圖 A1 楊希颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 30 hr (08172000~08190200 UTC)、(b) 中心登陸期間 14 hr (08190200~08191600 UTC)、(c) 出海後 29 hr (08191600~08202100 UTC)、(d) 侵台期間(08172000~08202100 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

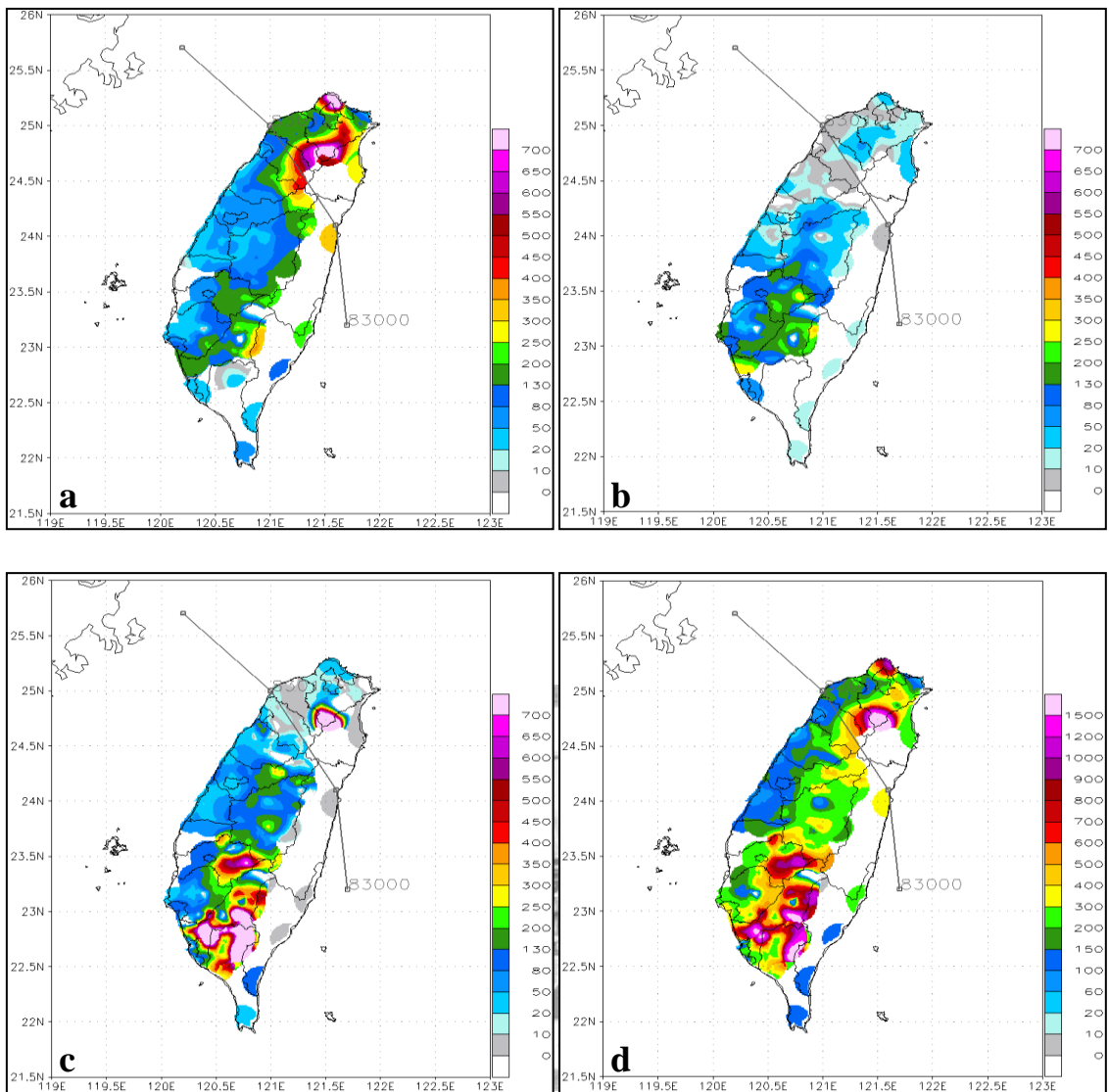


圖 A2 寶莉颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 71 hr (08270700~08300600 UTC)、(b) 中心登陸期間 6 hr (08300600~08301200 UTC)、(c) 出海後 38 hr (08301200~09010200 UTC)、(d) 侵台期間 (08270700~09010200 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

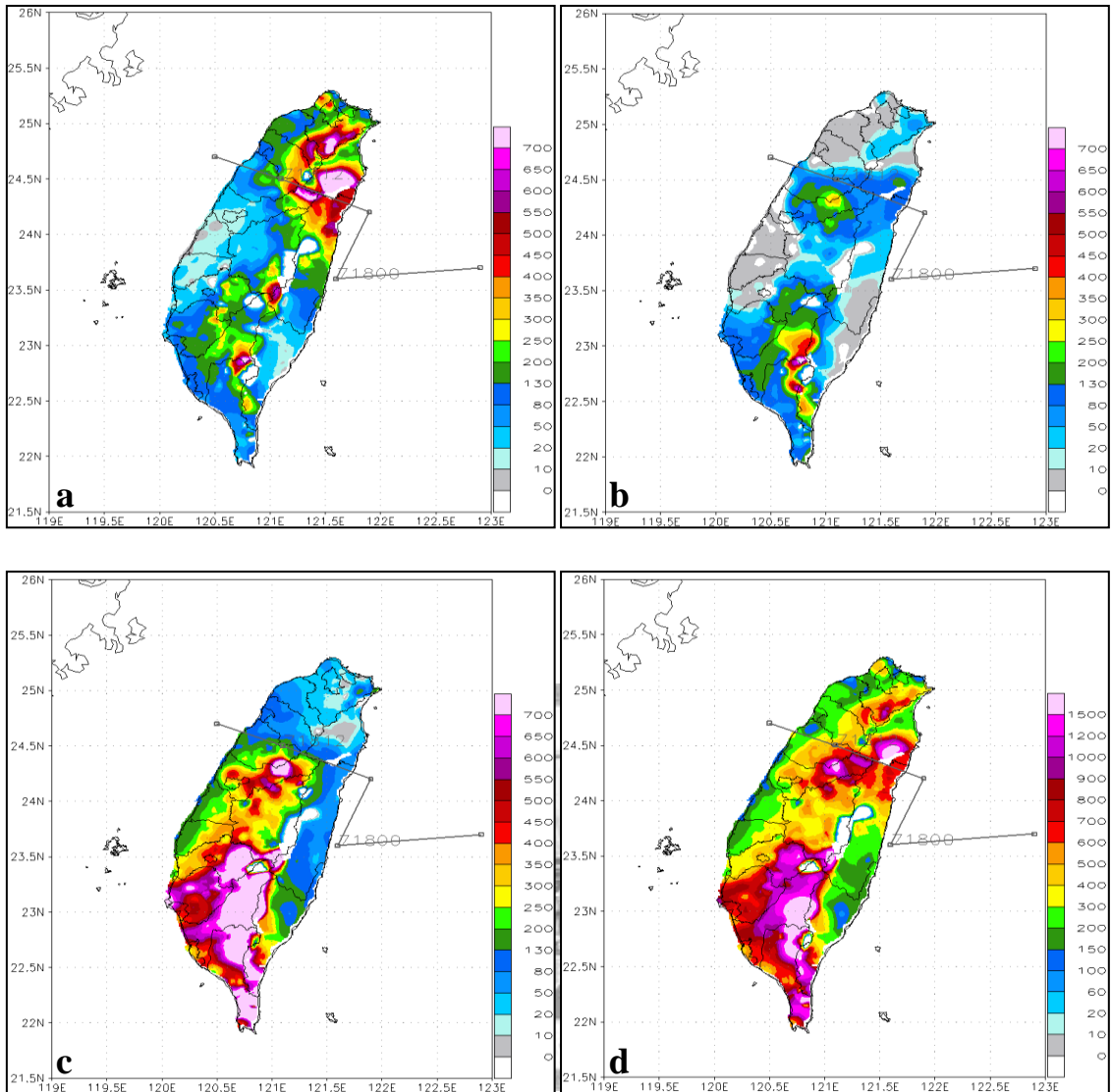


圖 A3 海棠颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 39 hr (07161500~07180600 UTC)、(b) 中心登陸期間 8 hr(07180600~07181400 UTC)、(c) 出海後 53 hr(07181400~07201900 UTC)、(d) 侵台期間 (07161500~07201900 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

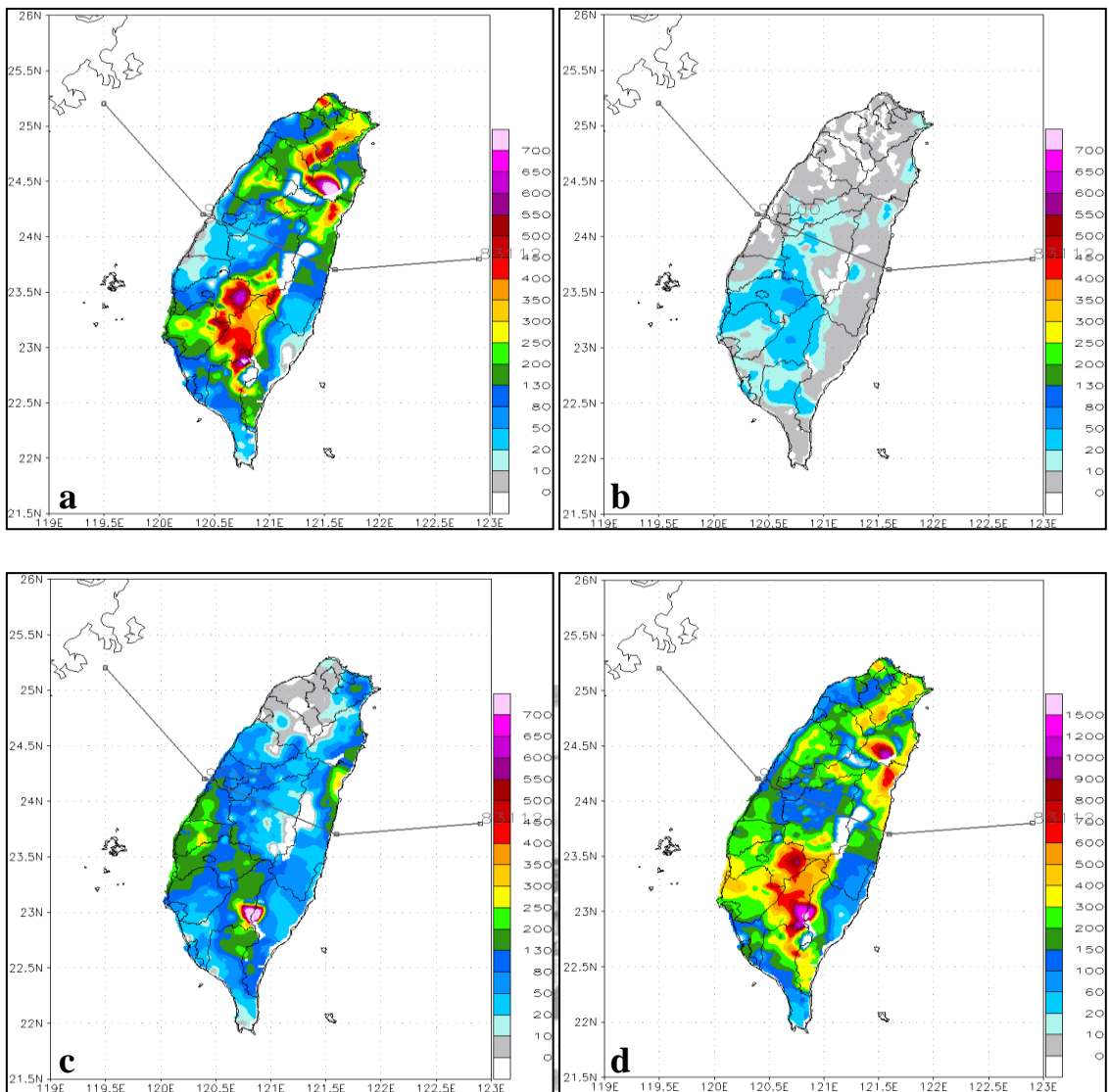


圖 A4 泰利颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 35 hr (08301200~08312300 UTC)、(b) 中心登陸期間 1 hr(08312300~09010000 UTC)、(c) 出海後 41 hr(08312300~09021600 UTC)、(d) 侵台期間 (08301200~09021600 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

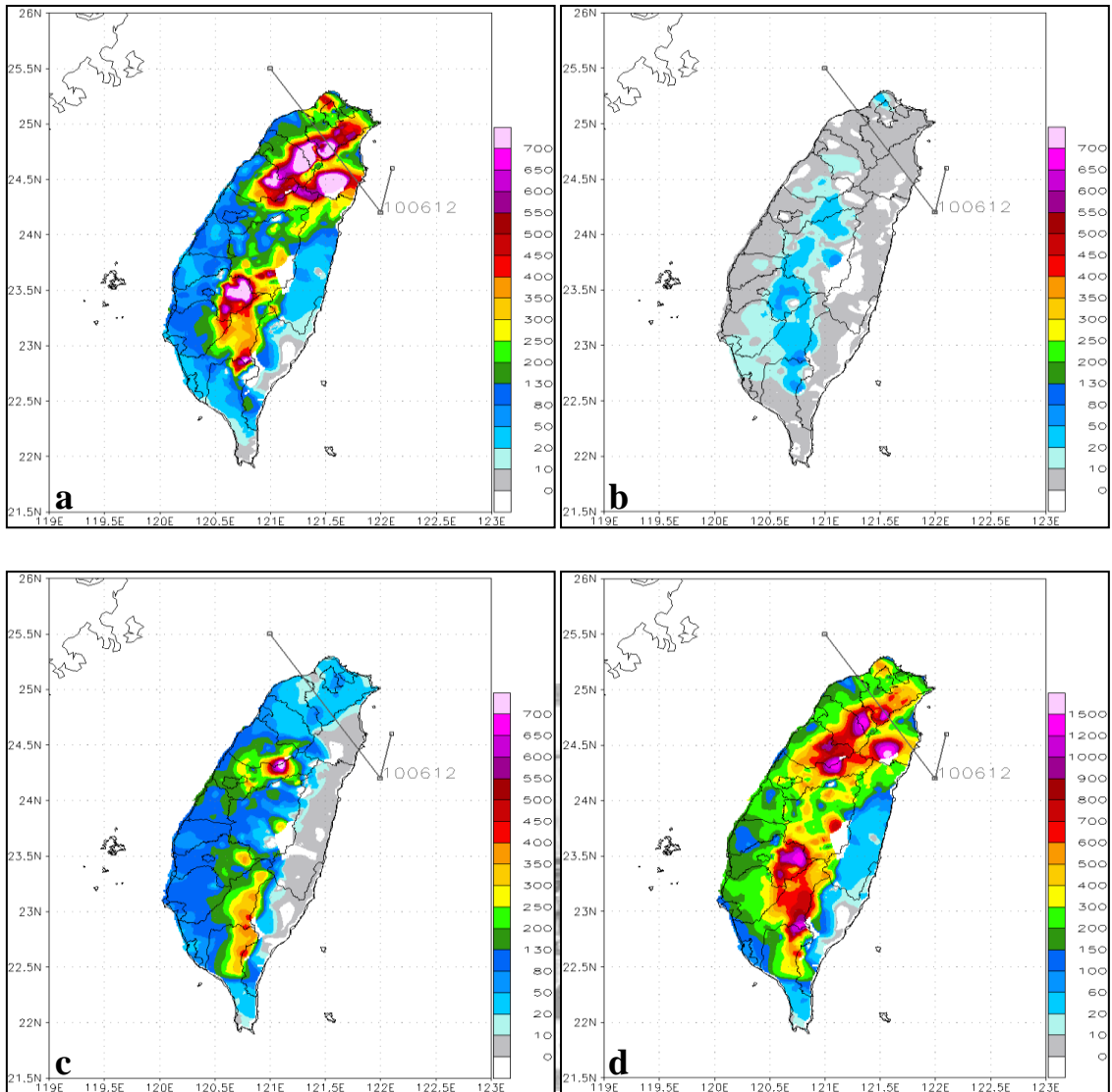


圖 A5 柯羅莎颱風累積雨量圖(a)登陸前 35 hr(10042100~10061400 UTC)·(b) 中心登陸期間 2 hr(10061400~10061600 UTC)·(c)出海後 45 hr(10061600 ~10081300 UTC)·(d) 侵台期間 (10042100~10081300 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

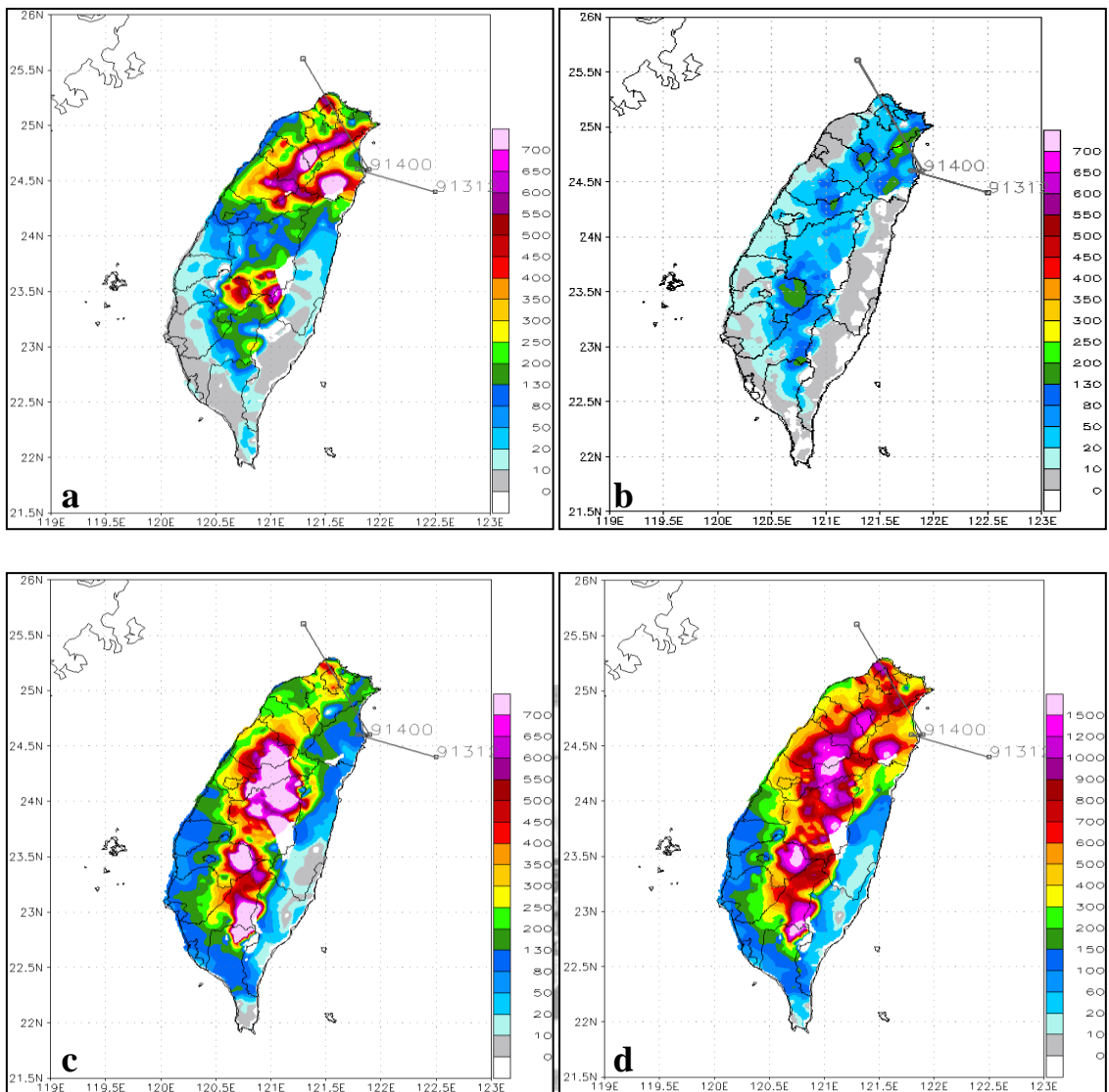


圖 A6 辛樂克颱風累積雨量圖(a)登陸前 44 hr(09112100~09131700 UTC)、(b)中心登陸期間 4 hr(09131700~09132100 UTC)、(c)出海後 64 hr(09132100~09161300 UTC)、(d)侵台期間(09112100~09161300 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

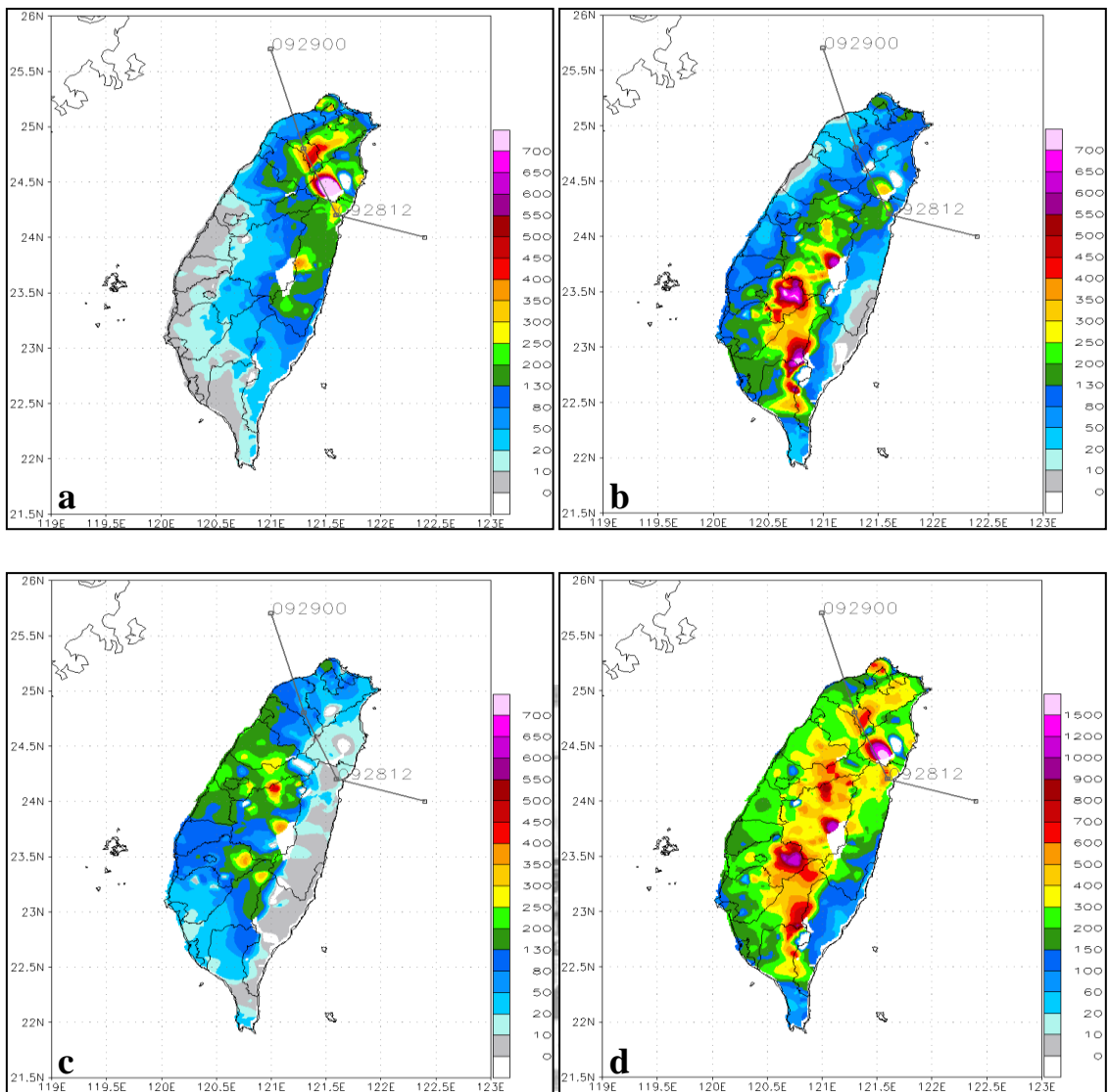


圖 A7 蕃蜜颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 31 hr (09270000~09280700 UTC)、(b) 中心登陸期間 14 hr (09280700~09282100 UTC)、(c) 出海後 37 hr (09282100~09301000 UTC)、(d) 侵台期間(09270000~09301000 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

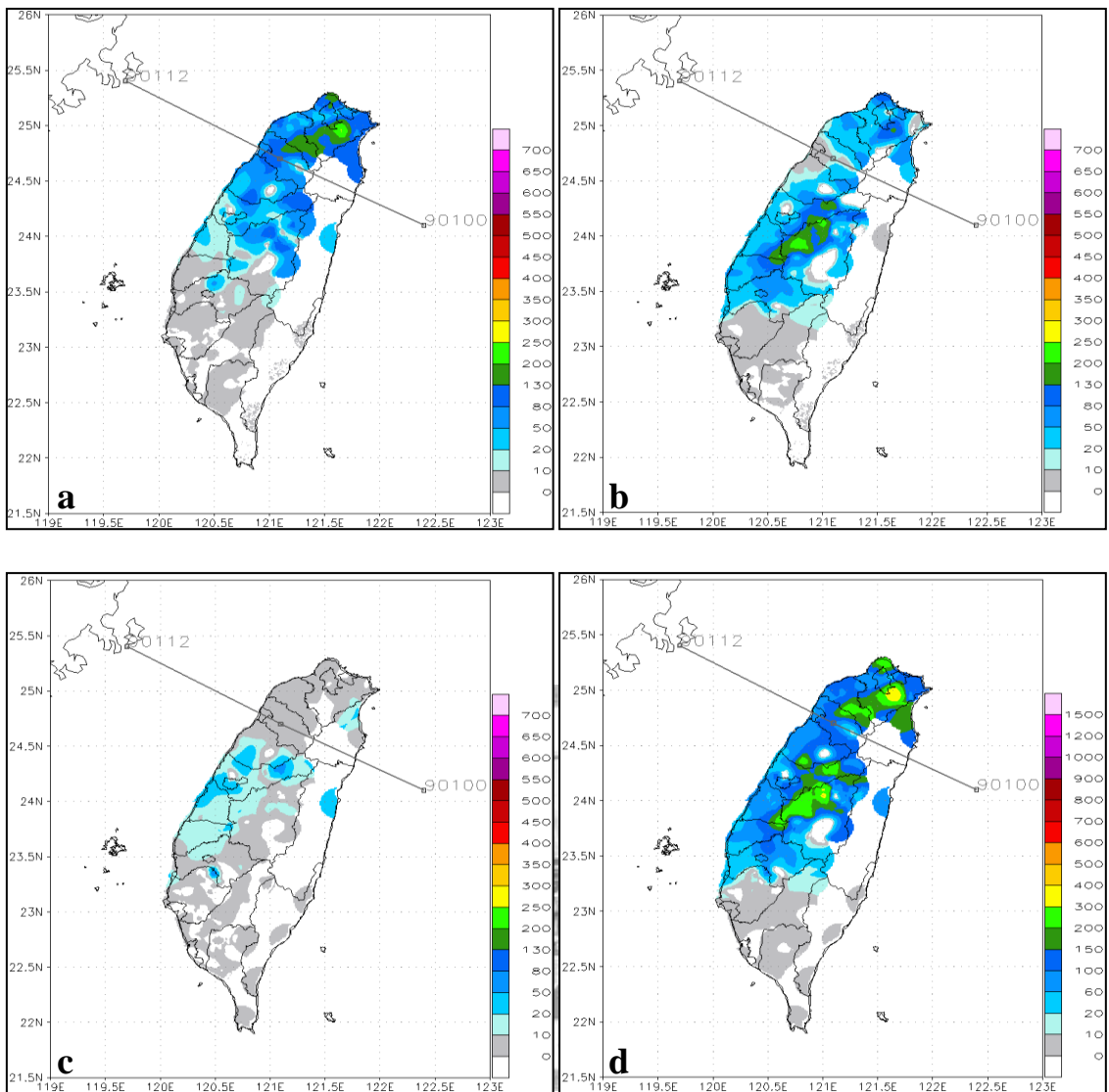


圖 A8 葛拉絲颱風累積雨量圖(a)登陸前 24 hr(08310200~09010200 UTC)、(b)中心登陸期間 5 hr (09010200~09010700 UTC)、(c)出海後 36 hr (09010700~09021900 UTC)、(d)侵台期間(08310200~09021900 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

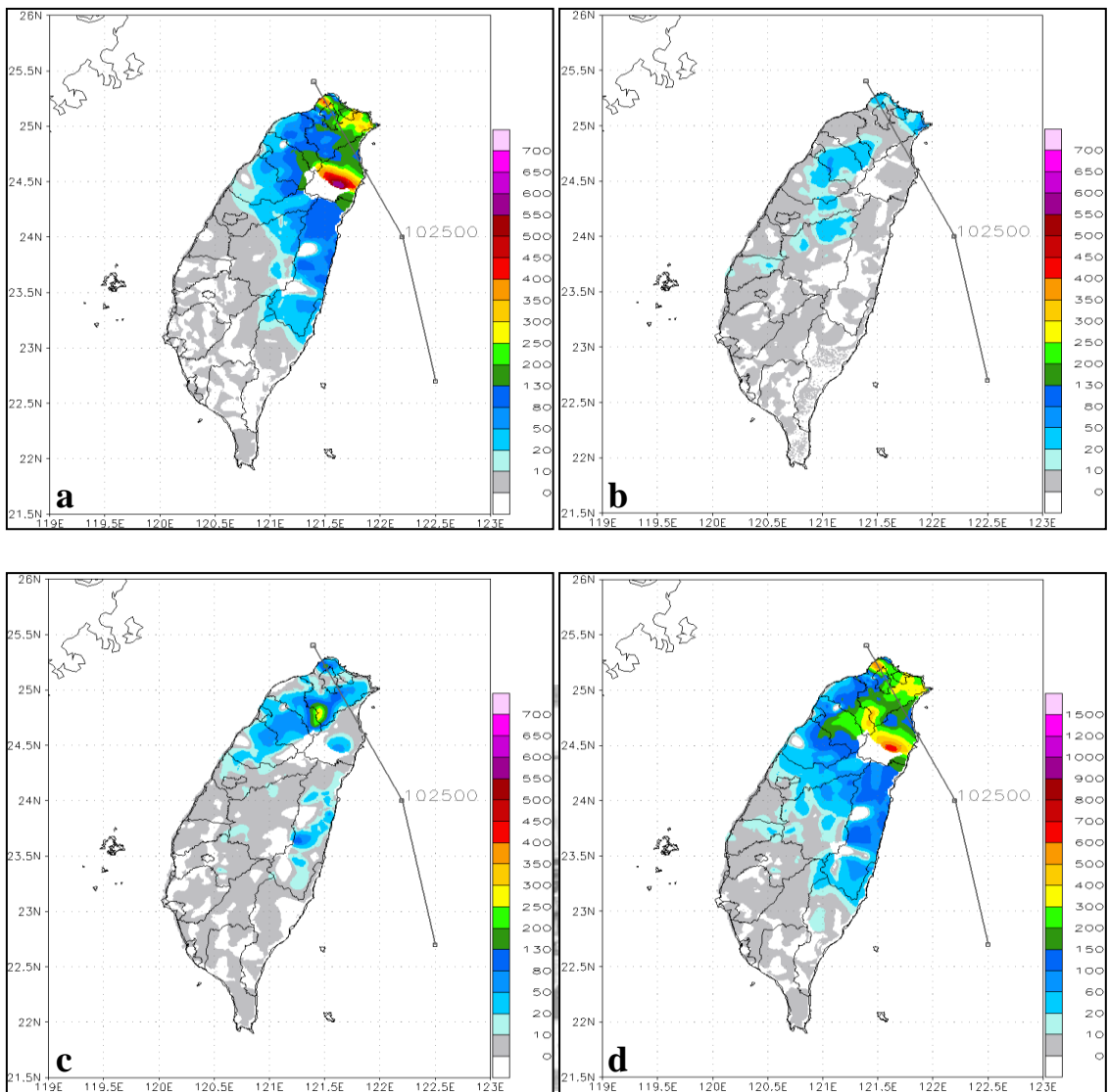


圖 A9 納坦颱風累積雨量圖 (a) 登陸前 29 hr (10232100~10250200 UTC)、(b) 中心登陸期間 4 hr(10250200~10250600 UTC)、(c) 出海後 34 hr(10250600~10261600 UTC)、(d) 侵台期間 (10232100~10261600 UTC) 總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

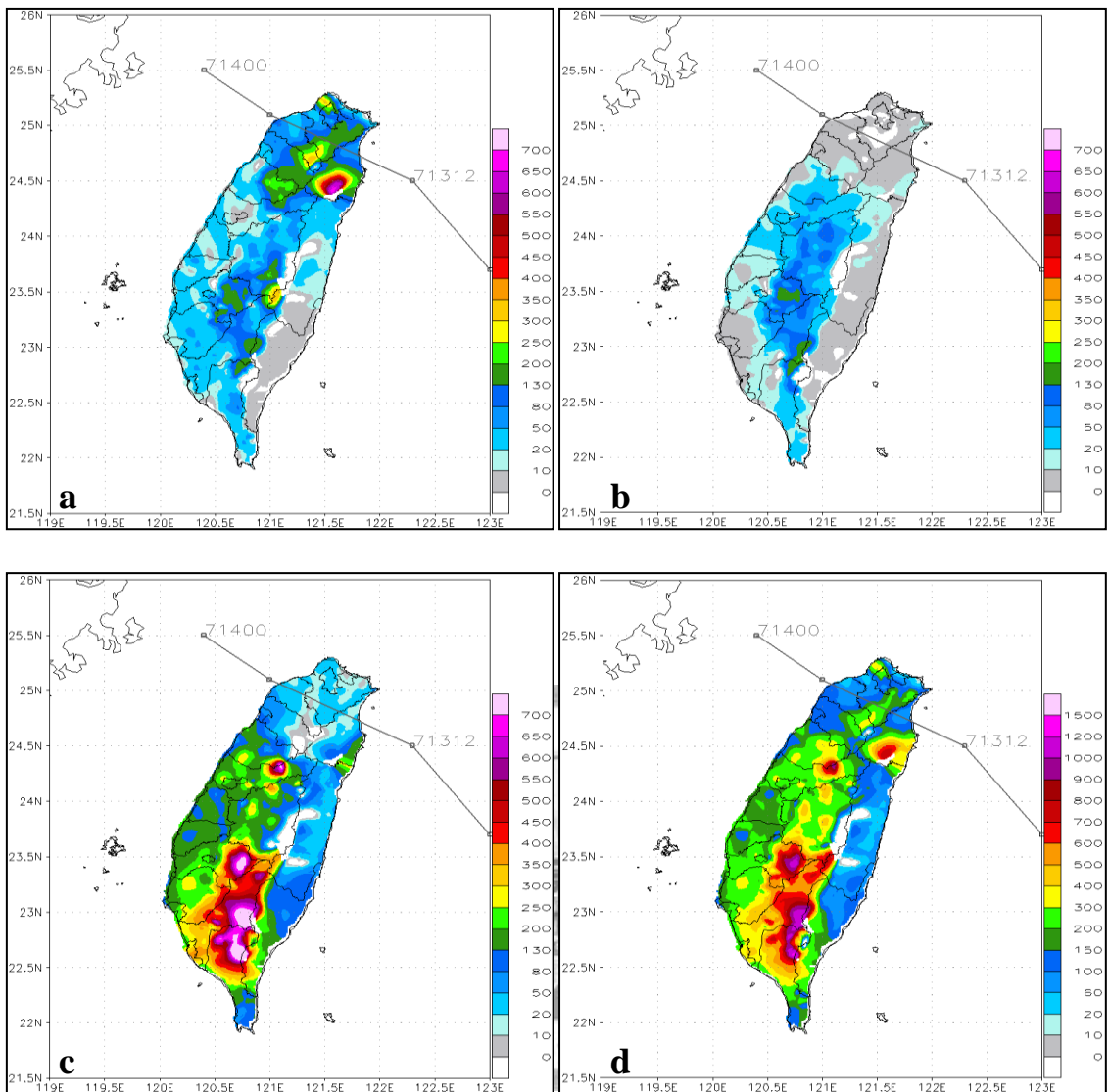


圖 A10 碧利斯颱風累積雨量圖(a)登陸前 38 hr(07120000~07131400 UTC)、(b)中心登陸期間 4 hr(07131400~07131800 UTC)、(c)出海後 49 hr(07131800~07151900 UTC)、(d)侵台期間(07120000~07151900 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

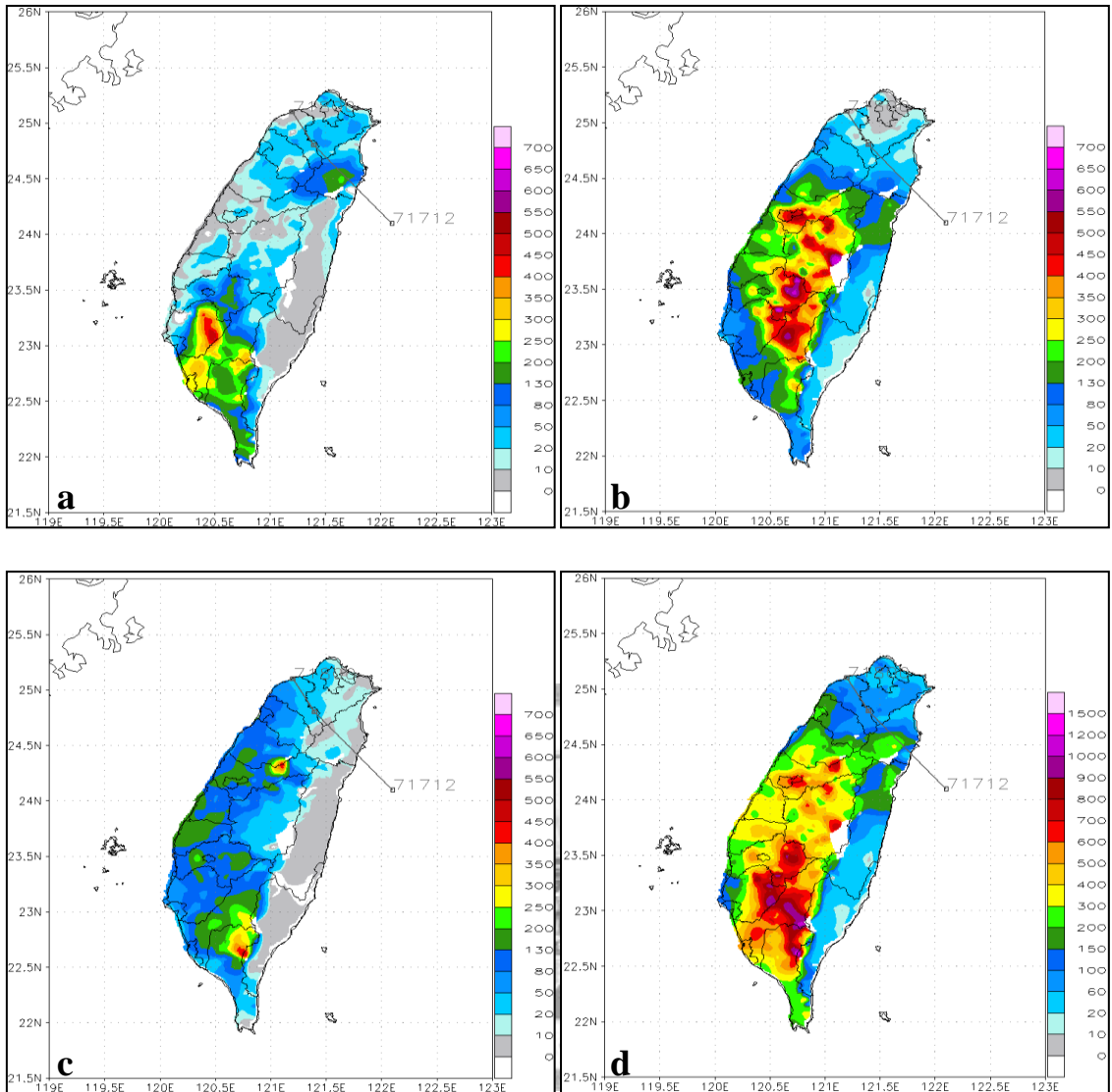


圖 A11 卡玫基颱風累積雨量圖(a)登陸前 19 hr(07161800~07171300 UTC)、(b)中心登陸期間 11 hr (07171300~07180000 UTC)、(c)出海後 37 hr (07180000~07191300 UTC)、(d)侵台期間(07161800~07191300 UTC)總雨量。(資料來源：CWB 局屬測站和自動雨量站)

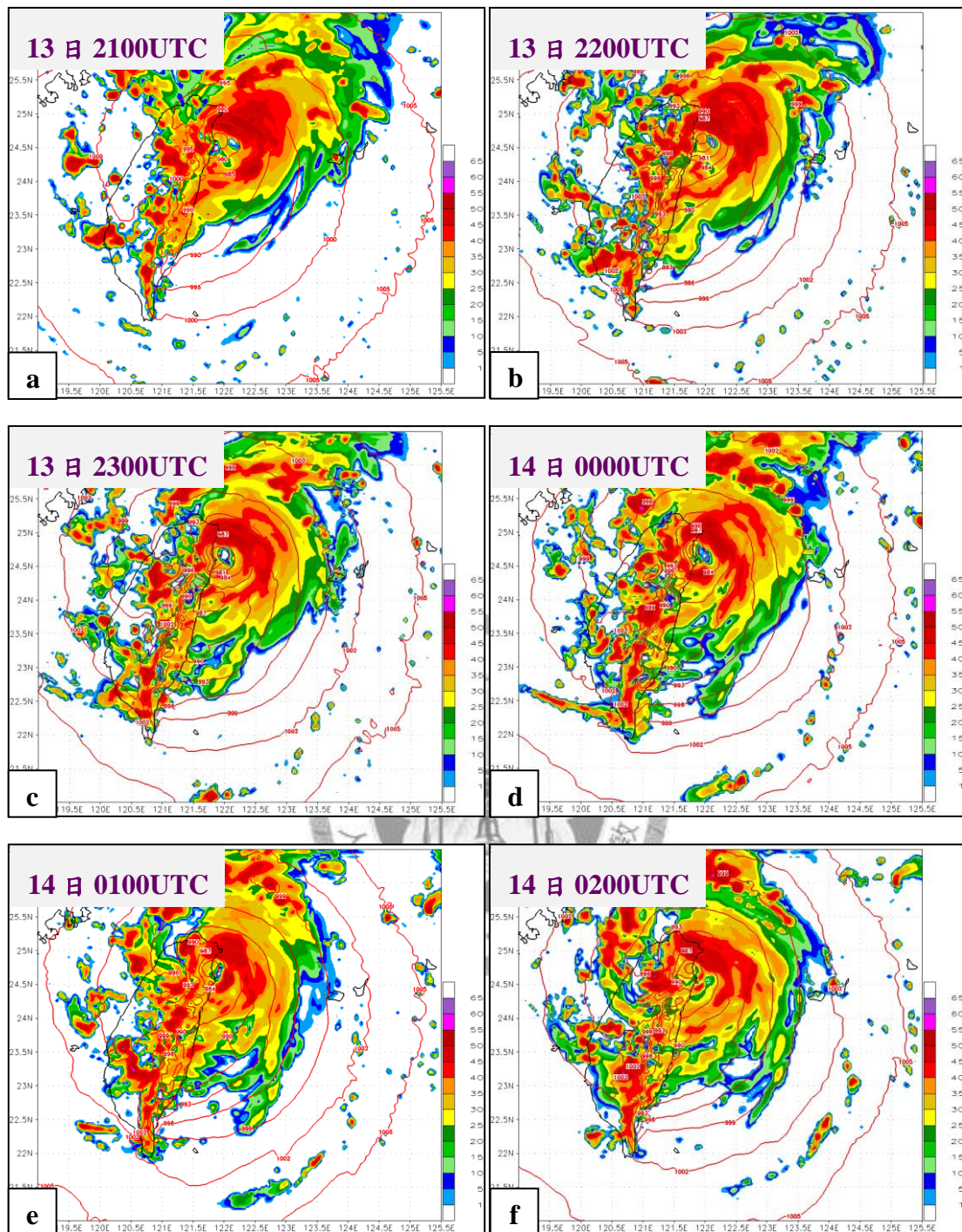


圖 B1 對照組 TR-60 模擬雷達回波圖 (dBZ)(a) 13 日 2100 UTC、(b) 13 日 2200 UTC、(c) 13 日 2300 UTC、(d) 14 日 0000 UTC、(e) 14 日 0100 UTC、(f) 14 日 0200 UTC。

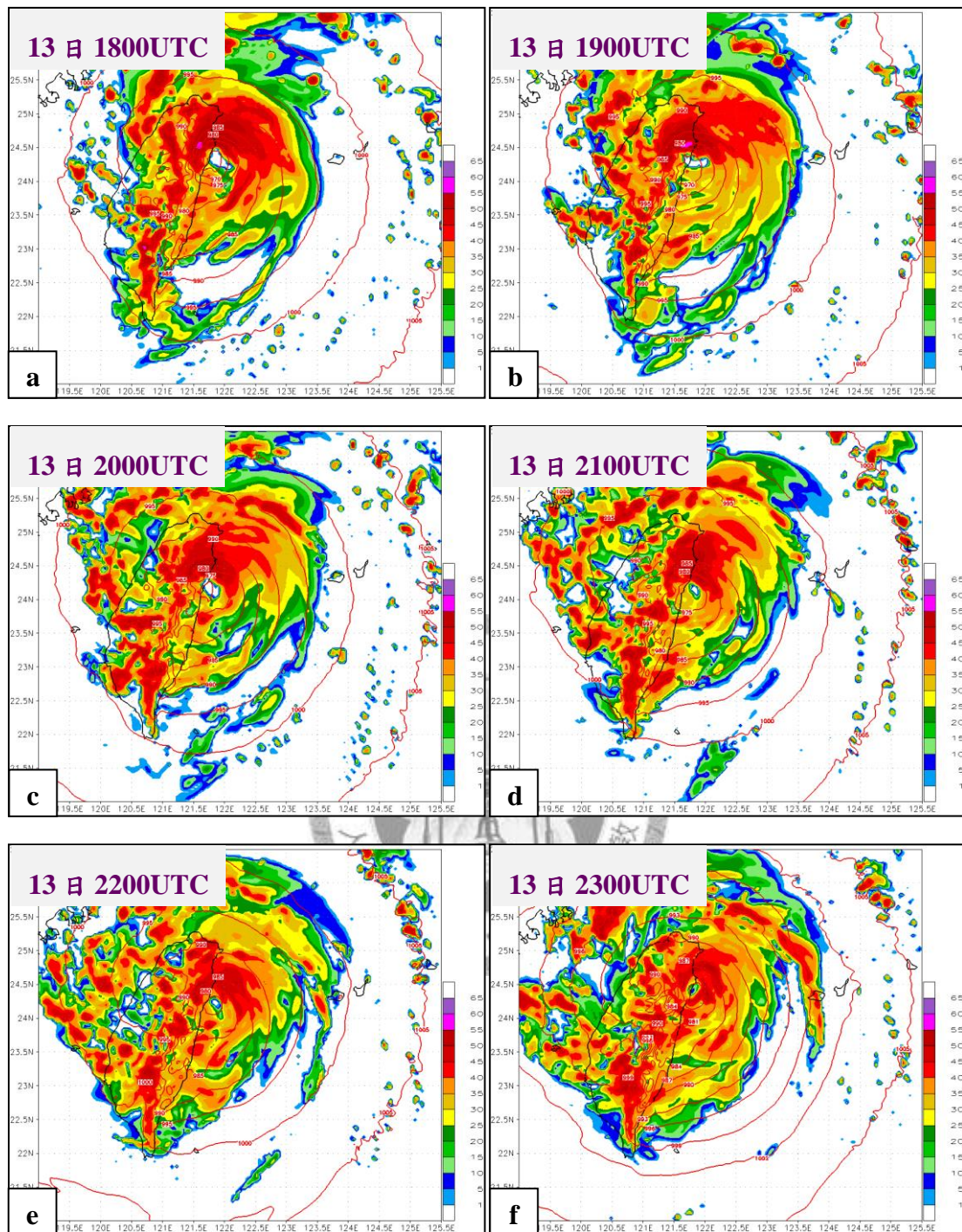


圖 B2 對照組 TR-80 模擬雷達回波圖 (dBZ)(a) 13 日 1800 UTC、(b) 13 日 1900 UTC、(c) 13 日 2000 UTC、(d) 13 日 2100 UTC、(e) 13 日 2200 UTC、(f) 13 日 2300 UTC。