

國立中央大學

大氣物理研究所
碩士論文

WRF 模式 Double-moment 雲微物理參數化
法對於 SoWMEX IOP-4 個案降水模擬
之敏感度研究

研究生：錢伊筠

指導教授：楊明仁 博士

中華民國九十九年七月



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(98 年 4 月最新修正版)

本授權書所授權之論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明)，為本人於國立中央大學，撰寫之碩/博士學位論文。(以下請擇一勾選)

(V)同意 (立即開放)

()同意 (一年後開放)，原因是：_____

()同意 (二年後開放)，原因是：_____

()同意 (三年後開放)，原因是：_____

()不同意，原因是：_____

以非專屬、無償授權國立中央大學圖書館與國家圖書館，基於推動「資源共享、互惠合作」之理念，於回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、公開陳列、與發行，或再授權他人以各種方法重製與利用，並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名：錢伊均 學號：976201016
論文名稱：WRF 模式 Double-moment 雲微物理參數化法對於 SoWMEX IOP-4 個案降水模擬之敏感度研究

指導教授姓名：楊明仁 博士

系所：大氣物理研究 所 博士班 碩士班

日期：民國 99 年 7 月 24 日

備註：_____

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔，紙本論文部分依著作權法第 15 條第 3 款之規定，採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽，如您有申請專利或投稿等考量，不同意紙本上架陳列，須另行加填聲明書，詳細說明與紙本聲明書請至 <http://thesis.lib.ncu.edu.tw/> 下載。
2. 本授權書請填寫並親筆簽名後，裝訂於各紙本論文封面後之次頁（全文電子檔內之授權書簽名，可用電腦打字代替）。
3. 請加印一份單張之授權書，填寫並親筆簽名後，於辦理離校時交圖書館（以統一代轉寄給國家圖書館）。
4. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

大氣物理 學系/研究所 錢伊筠 研

究生所提之論文

WRF 模式 Double-moment 雲微物理參數化法對
於 SoWMEX IOP-4 個案降水模擬之敏感度研究

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 楊明仁 (簽章)

99年7月9日

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

大氣物理 學系/研究所 錢伊筠 研究
生所提之論文
WRF 模式 Double-moment 雲微物理參數化
法對於 SoWMEX IOP-4 個案降水模擬之敏感度研
究 經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人

委

員

王重洋

隋中興

楊明仁

陳彥琦

中華民國 99 年 7 月 9 日

WRF 模式 Double-moment 雲微物理參數化法
對於 SoWMEX IOP-4 個案降水模擬之敏感度研究

摘 要

本研究以 SoWMEX 實驗期間 IOP-4 個案(2008 年 6 月 1 日至 4 日)進行研究，藉由密集觀測資料與 WRF(the Weather Research and Forecasting Model)模式中不同雲微物理參數化法的降水模擬結果進行比對，希望能瞭解 WRF 模式對於台灣地區梅雨鋒面個案的模擬能力。本研究共選取四種雙變數(double-moment)雲微物理參數化法(Morrison 方案, Thompson 方案, WDM5 方案, WDM6 方案)，以及兩種單變數(single-moment)雲微物理參數化法(WSM5 方案, WSM6 方案)進行測試。

本研究選取的個案是一道滯留在台灣附近的梅雨鋒面系統，伴隨著旺盛的西南氣流，並且在 2008 年 6 月 2 日和 3 日兩天都於高屏一帶的山坳前產生明顯的地形降水。模式模擬的綜觀尺度地面氣壓場和風場，以及西南氣流上游區域與主要密集觀測區域的模式探空結果，皆能合理的模擬出與觀測資料相似的結構，惟模擬風速較觀測風速弱約 30%。

七股雷達的觀測回波結果顯示 IOP-4 期間有兩波主要的降水系統經過高屏地區，模擬的雷達回波圖也大致顯示相似的結果。然而第一波降水系統的降水模擬結果和觀測的地面累積降水分佈較為相近，因此針對第一波降水系統進行與 NCAR/S-pol 雷達資料之雲微物理特徵比較。結果顯示，在六種雲微物理參數化法之中，Morrison scheme 對於這一波降水系統雲微物理垂直結構的模擬與觀測結果較相近。

就各種水相粒子混合比的平均場特徵而言，單以六種雲微物理方案對於第一波降水系統的模擬結果來討論，Morrison 方案較不會對於特定種類的水相粒子產生偏差，Thompson 方案傾向於產生大量的雪。WSM5、WDM5、WSM6、WDM6 方案中，有考慮軟雹的 WSM6 和 WDM6 方案的雪較少，沒有考慮軟雹的 WSM5、WDM5 方案的雪較多。另外，WDM5 和 WDM6 有計算水相粒子的粒子濃度，因此二者的水相粒子混合比分佈特徵類似。

The sensitivity study of precipitative simulation of WRF model double-moment
microphysics scheme for the SoWMEX IOP-4 case

ABSTRACT

The heavy rainfall case on 1-3 June 2008, also categorized as the IOP-4 event, during the SoWMEX/TiMREX field experiment is investigated in this study. The WRF(the Weather Research and Forecasting Model) model results are compared with the SoWMEX data, which has highly spatial and temporal resolution, in order to evaluate the WRF model ability to simulate the Mei-Yu frontal rainfall near Taiwan area. Two single-moment microphysics schemes and four double-moment microphysics schemes are chosen to perform sensitivity tests.

This rainfall event was associated with a stationary Mei-Yu front, and was accompanied by the surge of southwesterly flow from the South China Sea. Strong interactions of the Mei-yu front with steep terrains over southern Taiwan produced torrential precipitation over southern and southwestern Taiwan on 2-3 June 2008. The WRF-simulated synoptic pressure field, wind pattern and sounding structure were consistent with the observation data, but the simulated wind speed is 30% weaker than the observed speed from the DongSha sounding data.

Radar echoes at Chigu station show that two precipitation systems encountered southern Taiwan during the IOP-4 period, and the simulated radar echoes also show similar evolution. For the first precipitation system, the simulated surface precipitation is in better agreement with observation data than the second system. Thus, the microphysics features of the first system are further compared with the NCAR/S-pol radar data. It is found that Morrison scheme simulates the vertical structure reasonably well, compared to other five schemes.

The area-mean mixing ratio of each hydrometeor from the six microphysics scheme is compared for the first precipitation system. Morrison scheme is not biased toward a specific type of hydrometer; Thompson scheme tends to produce a large amount of snow. Compared to WSM5 and WDM5 scheme, WSM6 and WDM6 scheme produced less amount of snow, because of the considering of graupel. In addition, WDM5 and WDM6 schemes both calculate the number concentration and mixing ratio of liquid hydrometeors, thus they show similar distribution of liquid hydrometeors.

目	錄	
中文提要	.....	i
英文提要	.....	ii
目錄	.....	iii
表目錄	.....	v
圖目錄	.....	vi
第一章	緒論.....	1
1-1	研究動機.....	1
1-2	文獻回顧.....	3
1-3	論文結構.....	6
第二章	資料來源與研究方法.....	7
2-1	資料來源.....	7
2-1-1	觀測資料之來源.....	7
2-1-2	模式初始資料之來源.....	7
2-2	研究方法.....	7
第三章	個案天氣分析.....	9
第四章	模式架構與實驗設計.....	11
4-1	模式簡介.....	11
4-2	實驗設計.....	13
4-3	雲微物理參數化法簡介.....	14
第五章	模式結果.....	22
5-1	綜觀環境模擬.....	22
5-2	探空資料之校驗.....	22
5-3	模式降水系統與觀測降水系統的演變之對照.....	24
5-4	第三層網域降水分佈之校驗.....	25
5-4-1	第一波降水系統的降水分佈.....	26
5-4-2	第二波降水系統的降水分佈.....	28
5-5	第四層網域雷達回波之比對.....	28
5-6	垂直速度平均場.....	29
5-7	雲微物理特徵之校驗.....	31
5-7-1	降水系統中對流降水區的垂直雷達回波特徵.....	32
5-7-2	降水系統中對流降水區的垂直降水粒子分佈特徵.....	33
5-7-3	降水系統中層狀降水區的垂直雷達回波特徵.....	34
5-7-4	降水系統中層狀降水區的垂直降水粒子分佈特徵.....	34
5-8	混合比平均場.....	35
5-8-1	冰相粒子.....	36

5-8-2	水相粒子.....	37
5-9	混合比時空平均場.....	38
第六章	總結.....	42
參考文獻	.....	46
附錄	.....	52

表目錄

表 1 東沙島探空 700 百帕以下的平均風速資料，單位是 kts。最上兩行紫色字體標示日期及時間(UTC)，最左列的 O 表示觀測的平均風速、S 表示模擬的平均風速，均為該觀測時間的 700 百帕以下風速平均值。S/O 表示模擬的風速除以觀測的風速之比值。……………	53
--	----

圖目錄

- 圖 3.1 (a) 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 500 百帕天氣圖；(b) 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 500 百帕天氣圖；(c) 2008 年 6 月 3 日 1200UTC 500 百帕天氣圖；(d) 2008 年 6 月 4 日 0000UTC 500 百帕天氣圖。黑色實線為等高線，黑色粗實線是槽線位置，紅色虛線為等溫線。…………… 54
- 圖 3.2 (a) 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 850 百帕天氣圖；(b) 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 850 百帕天氣圖；(c) 2008 年 6 月 3 日 1200UTC 850 百帕天氣圖；(d) 2008 年 6 月 4 日 0000UTC 850 百帕天氣圖。黑色實線為等高線，黑色粗實線為 1500 公尺等高線，紅色虛線為等溫線。…………… 55
- 圖 3.3 (a) 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 地面天氣圖；(b) 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 地面天氣圖；(c) 2008 年 6 月 3 日 1200UTC 地面天氣圖；(d) 2008 年 6 月 4 日 0000UTC 地面天氣圖。黑色實線為等高線，黑色粗實線為 1500 公尺等高線，紅色虛線為等溫線，紫線是由地面風切線所決定之台灣臨近地區地面鋒面位置。…………… 56
- 圖 3.4 (a) 2008 年 6 月 1 日 1230UTC 紅外線色調強化衛星雲圖；(b) 2008 年 6 月 2 日 1230UTC 紅外線色調強化衛星雲圖；(c) 2008 年 6 月 3 日 1230UTC 紅外線色調強化衛星雲圖；(d) 2008 年 6 月 4 日 0030UTC 紅外線色調強化衛星雲圖。…………… 57
- 圖 3.5：(a)2008 年 6 月 2 日 0000LST~2008 年 6 月 3 日 0000LST 24 小時地面累積雨量圖；(b)2008 年 6 月 3 日 0000LST~2008 年 6 月 4 日 0000LST 24 小時地面累積雨量圖。…………… 58
- 圖 3.6 (a)SoWMEX 實驗探空氣球施放點，陸上觀測站有 BC-板橋站、TC-台中站、HL-花蓮站、MK-馬公站、TN-台南永康站、LG-六龜站、LT-綠島、HC-恆春站、DSI-東沙島、PHIL-菲律賓，海上觀測站有 NSp-北船、SSp-南船，北船和南船標示點為估計位置；(b)台灣地形圖
(<http://gis.geo.ncu.edu.tw/earth/shade/twshade.htm>)。…………… 58
- 圖 3.7 東沙島探空圖，依照時間排序分別為：(a)2008 年 6 月 1 日 1200UTC、(b)2008 年 6 月 2 日 0600UTC、(c)2008 年 6 月 3 日 0000UTC、(d)2008 年 6 月 3 日 1800UTC。…………… 59

圖 3.8 屏東站探空圖，(a) (b) (c) (d)的說明如圖 3.7。.....	60
圖 3.9 恆春站探空圖，(a) (b) (c) (d)的說明如圖 3.7。.....	61
圖 3.10 六龜站探空圖，(b)的說明如圖 3.7。(a) 的時間點為 2008 年 6 月 1 日 1400UTC、(c)時間點為 2008 年 6 月 2 日 2300UTC、(d)時間點為 2008 年 6 月 3 日 1700UTC，可能是觀測時遇到某些技術上的問題，故這三筆資料與其他探空測站的觀測時間稍有不同，使用資料時需要考慮時間差異的因素。.....	62
圖 3.11 台南永康站探空圖，(a) (b) (d)的說明如圖 3.7，(c)時間點為 2008 年 6 月 3 日 0300UTC，因為該站 2008 年 6 月 3 日 0000UTC 探空可能有問題，不利於判讀，故改放後一個時間點的觀測資料。.....	63
圖 3.12 綠島站探空圖，(a) (b) (c) (d)的說明如圖 3.7。.....	64
圖 4.1 為 WRF 模式的基本架構。.....	65
(取自 http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/users_guide_chap1.html)	
圖 4.2 本論文研究所使用之 WRF 模式網域設定，左側為水平網域範圍，右側為垂直分層示意圖。水平網域共設四層巢狀網格，第一層網域(D01)的水平網格間距為 45 公里，第二層網域(D02)的水平網格間距為 15 公里，第三層網域(D03)的水平網格間距為 5 公里，第四層網域(D04)的水平網格間距為 1.67 公里。垂直分層共 32 層，模式頂層氣壓設為 10 百帕。.....	65
圖 5.1 WRF 模式模擬結果的綜觀尺度預報場，為第一層網域的 500 百帕高度場及風場。黑色等值線為高度場，等值線間距為 60 公尺；風標一長槓為 5m/s，粗黑色實線為槽線位置。(a)圖是 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 的預報場；(b)圖是 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 的預報場，(c)圖是 2008 年 6 月 3 日 1200UTC 的預報場，(d)圖是 2008 年 6 月 4 日 0000UTC 的預報場。.....	66
圖 5.2 WRF 模式模擬結果的綜觀尺度預報場，為第一層網域的 850 百帕高度場、溫度場及風場。黑色等值線為高度場，等值線間距為 30 公尺；粗黑線是 1500 公尺等值線；紅色虛線為等溫線，等值線間距為 3°C；紅色實線是 18 °C 等溫線；風標一長槓為 5m/s。(a)(b)(c)(d)的預報場時間點同圖 5.1.....	67

圖 5.3 WRF 模式模擬結果的綜觀尺度預報場，為第一層網域的海平面氣壓場及風場。黑色等值線為氣壓場，等值線間距為 2 百帕；風標一長槓為 5m/s。(a)(b)(c)(d)的預報場時間點同圖 5.1。.....	68
圖 5.4 東沙島模式探空圖。藍色實線為溫度線，紅色實線為露點溫度線，風標一長槓為 5m/s。(a)圖預報場時間點為 2008 年 6 月 1 日 1200UTC；(b)圖預報場時間點為 2008 年 6 月 2 日 0600UTC；(c)圖預報場時間點為 2008 年 6 月 3 日 0000UTC；(d)圖預報場時間點為 2008 年 6 月 3 日 1800UTC。.....	69
圖 5.5 屏東站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。.....	70
圖 5.6 恆春站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。.....	71
圖 5.7 六龜站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。.....	72
圖 5.8 台南站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。.....	73
圖 5.9 綠島站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。.....	74
圖 5.10 為第一波降水系統登陸台灣西南部，到最後消散之主要演變過程。左欄是 WRF 模式模擬 MORI 實驗結果的第三層網域高度 1 公里之雷達回波與 850 百帕風場圖，右欄為七股雷達回波觀測結果。左右欄各選取模擬降水系統與觀測降水系統發展之相近時期，而非以相同的絕對時間做對照。模式預報場的(a)時間為 2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(c)時間為 2008 年 6 月 2 日 0200UTC，(e)時間為 2008 年 6 月 2 日 0500UTC。七股雷達觀測的(b)時間為 2008 年 6 月 2 日 0538UTC，(d)時間為 2008 年 6 月 2 日 0715UTC，(f)時間為 2008 年 6 月 2 日 1245UTC。.....	75
圖 5.11 為第二波降水系統登陸台灣西南部，到最後消散之主要演變過程。說明同圖 5.11。模式預報場的(a)時間為 2008 年 6 月 3 日 0000UTC，(c)時間為 2008 年 6 月 3 日 0600UTC，(e)時間為 2008 年 6 月 3 日 0900UTC，(g)時間為 2008 年 6 月 3 日 1200UTC。七股雷達觀測的(b)時間為 2008 年 6 月 2 日 2230UTC，(d)時間為 2008 年 6 月 3 日 0015UTC，(f)時間為 2008 年 6 月 3 日 0323UTC，(h)時間為 2008 年 6 月 3 日 1138UTC。.....	77

圖 5.12 為 SoWMEX IOP-4 個案期間，兩波降水系統演變過程之時序示意圖，上圖為觀測之降水系統，下圖為模擬的降水系統。第一波降水系統以藍色和橘色區塊表示，藍色區塊左側標示的時間點約為第一波降水系統在海上開始發展的時間，藍色區塊與橘色區塊交接處標示的時間點為第一波降水系統前緣開始登陸台灣西南部陸地的時間，橘色區塊右側的時間點為第一波降水系統大致上消散的時間。第二波降水系統以黃色和綠色區塊表示，時間點區分與標示方法同第一波降水系統。……………	79
圖 5.13 為 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 之 24 小時地面累積降水圖。(a)為 MORI 實驗的結果，(b) 為 THMN 實驗的結果，(c) 為 WSM5 實驗的結果，(d) 為 WDM5 實驗的結果，(e) 為 WSM6 實驗的結果，(f) 為 WDM6 實驗的結果。……………	80
圖 5.14 為 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 之 24 小時地面累積降水差異圖。(a)為 WSM5 實驗與 WDM5 實驗的累積降水差異，(b)為 WSM6 實驗與 WDM6 實驗的累積降水差異，(c) 為 WSM5 實驗與 WSM6 實驗的累積降水差異，(d) 為 WDM5 實驗與 WDM6 實驗的累積降水差異。……………	81
圖 5.15 為第三層網域 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 平均降水，分別使用六種雲微物理參數化方案的實驗結果。……………	82
圖 5.16 為第四層網域 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 平均降水，分別使用六種雲微物理參數化方案的實驗結果。……………	82
圖 5.17 為 2008 年 6 月 2 日 1600UTC 至 2008 年 6 月 3 日 1600UTC 之 24 小時地面累積降水圖。(a) (b) (c) (d) (e) (f) 的說明同圖 5.14。……………	83
圖 5.18 對流降水與層狀降水之特徵區別示意圖，取自 Houze (1997) Figure 1。(a)圖為對流降水之垂直運動場特徵；(b)圖為對流降水系統內部，降水粒子軌跡線特徵，碰撞合併作用為其主要的成長因素；(c)圖為對流降水系統的雷達回波垂直剖面之特徵；(d)圖為層狀降水之垂直運動場特徵；(e)圖為層狀降水系統內部，降水粒子軌跡線特徵；(f)圖為層狀降水系統的雷達回波垂直剖面之特徵。……………	84

圖 5.19 為 NCAR/S-pol 0.5° 仰角之雷達回波觀測結果，(a)2008 年 6 月 2 日 0430UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0731UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0824UTC，(d)2008 年 6 月 2 日 0946UTC。.....	85
圖 5.20 為 MORI 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a) 2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(b) 2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(c) 2008 年 6 月 2 日 0200UTC。.....	86
圖 5.21 為 THMN 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(b) 2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(c) 2008 年 6 月 2 日 0200UTC。.....	87
圖 5.22 為 WSM5 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 1 日 2300UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(d)2008 年 6 月 2 日 0200UTC。.....	88
圖 5.23 為 WDM5 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0200UTC，(d)2008 年 6 月 2 日 0300UTC。.....	89
圖 5.24 為 WSM6 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 1 日 2300UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0100UTC。.....	90
圖 5.25 為 WDM6 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 1 日 2300UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0100UTC。.....	91
圖 5.26 紅色色階表示地形高度。綠色方框的範圍是東經 120.0°~120.9°、北緯 21.9°~23.0°，為圖 5.27、圖 5.36 和圖 5.37 計算平均場的範圍。圖中 A 點是 NCAR/S-pol 雷達在 SoWMEX 實驗期間設置的位置(120.4345° E, 22.52693° N)，AB 連線為圖 5.33 和圖 5.35 的垂直剖面基準線，AC 連線為圖 5.29 和圖 5.31 的垂直剖面基準線。.....	92

圖 5.27 為圖 5.26 綠色方框範圍內之垂直速度的平均值對高度及時間做圖，黑色實線表示垂直速度為正值，黑色虛線表示垂直速度為負值，等值線間距為 0.05cm/s。(a)是 MORI 實驗的結果，(b)是 THMN 實驗的結果，(c)是 WSM5 實驗的結果，(d)是 WDM5 實驗的結果，(e)是 WSM6 實驗的結果，(f)是 WDM6 實驗的結果。…………… 93

圖 5.28 是 NCAR/S-pol 雷達回波於 2008 年 6 月 2 日 0729UTC 的 RHI (range-height indicator)掃描觀測結果，方位角為 60°。…………… 96

圖 5.29 第四層網域取圖 5.26 中 AC 連線的垂直剖面與左右各 8.35 公里，模擬的雷達回波和垂直速度側向平均值。色階為雷達回波，色階間隔為 3dBz；黑色實線表示垂直速度為正值，黑色虛線表示垂直速度為負值，等值線間距皆為 30cm/s；高度 5 公里左右的零值線為 0°C 等溫線。(a)是 MORI 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的模擬結果，(b)是 THMN 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的模擬結果，(c)是 WSM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC 的模擬結果，(d)是 WDM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的模擬結果，(e)是 WSM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC 的模擬結果，(f)是 WDM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC 的模擬結果。…… 97

圖 5.30 NCAR/S-pol 雷達資料辨識的水相粒子分類圖。掃描時間為 2008 年 6 月 2 日 0729UTC 的 RHI (range-height indicator)，方位角為 60°。色塊所相對應的粒子種類，從左而右依序是雲滴、毛雨、小雨、中雨、大雨、冰雹、雨和冰雹混合、軟雹和小冰雹、軟雹和雨、乾雪、溼雪、冰晶、不規則冰晶、過冷水、昆蟲、二次回波、地形回波。…………… 99

圖 5.31 第四層網域取圖 5.26 中 AC 連線的垂直剖面與左右各 8.35 公里，模擬的水相粒子質量混合比和融化層以上之溫度的側向平均值。紫色為雲冰混合比等值線，等值線間距為 0.005g/kg；藍色為雪混合比等值線，等值線間距為 0.1g/kg；綠色為軟雹混合比等值線，等值線間距為 0.05g/kg；紅色為雨水混合比等值線，等值線間距為 0.05g/kg。(a) (b) (c) (d) (e) (f)的說明同圖 5.29。…………… 100

圖 5.32 NCAR/S-pol 雷達回波於 2008 年 6 月 2 日 0750UTC 的 RHI (range-height indicator)掃描觀測結果，方位角為 32°。…………… 102

圖 5.33 第四層網域取圖 5.26 中 AB 連線的垂直剖面與左右各 8.35 公里，模擬的雷達回波和垂直速度側向平均值。色階為雷達回波，色階間隔為 3dBz；黑色實線表示垂直速度為正值，黑色虛線表示垂直速度為負值，等值線間距皆為 20cm/s。(a)是 MORI 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的模擬結果，(b)是 THMN 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的模擬結果，(c)是 WSM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的模擬結果，(d)是 WDM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0300UTC 的模擬結果，(e)是 WSM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的模擬結果，(f)是 WDM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的模擬結果。…………… 103

圖 5.34 是 NCAR/S-pol 雷達資料辨識的水相粒子分類圖。掃描時間為 2008 年 6 月 2 日 0750 UTC 的 RHI (range-height indicator)，方位角為 32°。色塊所代表的水相粒子分類說明同圖 5.30。…………… 105

圖 5.35 第四層網域取圖 5.26 中 AB 連線的垂直剖面與左右各 8.35 公里，模擬的水相粒子質量混合比和融化層以上之溫度的側向平均值。紫色為雲冰混合比等值線，等值線間距為 0.005g/kg；藍色為雪混合比等值線，等值線間距為 0.1g/kg；綠色為軟雹混合比等值線，等值線間距為 0.1g/kg；紅色為雨水混合比等值線，等值線間距為 0.1g/kg。(a) (b) (c) (d) (e) (f)的說明同圖 5.33。…………… 106

圖 5.36 為第一波降水系統的水相粒子混合比之空間側向平均值隨高度變化圖。空間平均取圖 5.26 綠色方框內的範圍。(a)是 MORI 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100 UTC 的結果，(b)是 MORI 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200 UTC 的結果；(c)是 THMN 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100 UTC 的結果，(d)是 THMN 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200 UTC 的結果；(e)是 WSM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000 UTC 的結果，(f)是 WSM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200 UTC 的結果；(g)是 WDM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100 UTC 的結果，(h)是 WDM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0300 UTC 的結果；(i)是 WSM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC 的結果，(j)是 WSM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100 UTC 的結果；(k)是 WDM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000 UTC 的結果，(l)是 WDM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200 UTC 的結果。紫線為雲冰混合比，藍線為雪混合比，綠線為軟雹混合比，橘線為雲水混合比，紅線為雨水混合比。…………… 108

圖 5.37 為第一波降水系統的水相粒子混合比之時空平均值隨高度變化圖。時間平均範圍是 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 間的逐時資料之平均，空間平均取圖 5.26 綠色方框內的範圍。紫線為雲冰混合比，藍線為雪混合比，綠線為軟雹混合比，橘線為雲水混合比，紅線為雨水混合比。……………

112

第一章 緒論

1-1 研究動機

在近幾十年來數值模式不斷地改進，氣象觀測的技術與品質也都大幅提升，進而提供數值模式更佳的初始條件，使得模式在風場、溫度場、氣壓場與重力位高度場的預報誤差已經有明顯的減小。然而，數值模式對於降水場預報的改善，相對而言卻是十分緩慢；因此降水一直被認為是數值模式中最難準確預報的參數之一。單就台灣地區的降水模擬而言，主要有四方面的困難：一、大氣的運動為非線性過程，並且降水的物理過程對於環境風場、濕度場和熱力場變化存在高度的敏感性；二、中尺度數值模式對於降水過程的計算，主要透過積雲參數化法和雲微物理參數化法來處理，但是每一種參數化方案其原始設計的假設，不一定適用於台灣地區的降水現象；三、台灣地區除了西側以外，其餘三面皆比鄰範圍遼闊的海域，缺乏觀測資料，對於模式初始條件的準確度造成相當大的限制；四、台灣島本身具有狹長的地形與陡峻的山脈，使得常見的強降水系統—颱風、梅雨鋒面等，在登陸前後增加了與地形之間所產生複雜的交互作用，更增加降水模擬的困難度。

降水預報具有相當大的挑戰，尤其本研究中探討台灣地區暖季豪雨現象中之梅雨鋒面的降水，更是每年五、六月春末夏初時節影響台灣

地區的主要天氣現象。台灣地區的梅雨鋒面系統是由中國大陸中高緯度來的乾冷氣團和從南方熱帶海域來的暖濕氣團，在華南及台灣地區交互作用的結果。梅雨現象最主要的特徵，包括在地面天氣圖有一滯留鋒，伴隨顯著水氣梯度，在 850hPa 以風切線形式出現，並且在衛星雲圖常可觀測一明顯雲帶，由日本南方海面往西南延伸經台灣至華南地區。此梅雨鋒面雲帶內經常有組織良好的中尺度對流系統 (Mesoscale Convective System, MCS)，伴隨顯著中尺度天氣現象，帶來劇烈豪雨，近年來甚至不時傳出梅雨鋒面造成局部地區的淹水或土石坍塌等災情。

針對豪雨預警和防減災需求，進而加強西南氣流導致的豪大雨天氣系統之基礎科學認知，以改進現有短期定量降雨估計與預報精確度，國內氣象界與美國 NCAR(The National Center for Atmospheric Research)及其他單位科學家們於 2008 年 5 月 15 日至 6 月 30 日於南中國海北部和台灣本島及臨近海域，共同進行「西南氣流觀測與豪雨預測實驗」，簡稱「西南氣流實驗」，英文縮寫為 SoWMEX (Southwest Monsoon Experiment)，又稱 TiMREX (Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment)。此實驗取得許多高空間、時間解析度的觀測資料，不僅高密集度的探空資料能提供梅雨季西南氣流的熱動力變化性質，再加上 S-pol (S-band Dual Polarization Radar)及 TEAM-R(Taiwan

Experimental Atmospheric Mobile-Radar)雙偏極化雷達的觀測，可提供台灣西南部地區梅雨季豪雨系統內部的雲物理資訊，配合其他的密集觀測資料，皆有助於增加對於梅雨季豪雨發生原因和豪雨系統的演變等物理特徵之瞭解，亦可作為數值模式模擬結果的校驗資料，或是作為數值模式參數化所需參數的設定基礎，用來改善現有模式之定量降水預報能力。

本研究選取 SoWMEX 實驗期間 IOP-4 個案(2008/6/1~2008/6/3)進行研究，藉由密集觀測資料與 WRF(the Weather Research and Forecasting Model)模式中使用不同雲微物理參數化法的降水模擬結果進行比對，希望能瞭解 WRF 模式 Single-moment scheme 及 Double-moment scheme 對於台灣地區梅雨鋒面個案降水現象的掌握程度。

1-2 文獻回顧

多年以來，數值模式中的雲物理過程普遍以兩種參數化方法來處理，一是直接計算降水粒子之粒徑分布的 bin-resolving method，一是 bulk method。然而，與 bulk method 相比，bin-resolving method 所需的計算時間增加很多，為了讓模式計算有較高的效率，多數的預報或模擬實驗目前仍主要使用根據 bulk method 的雲微物理參數化方案。

就bulk method而言，早期應用於MM5 (The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model)或WRF等中尺度數值模式的雲微物理法大多是single-moment的架構(Kessler 1969; Wisner et al. 1972; Lin et al. 1983，後簡寫為LFO83; Rutledge and Hobbs 1984，後簡寫為RH84; Cotton et al. 1986; Dudhia 1989，後簡寫為D89; Tao and Simpson 1993; Walko et al. 1995; Kong and Yau 1997)，僅針對水相粒子的質量混和比進行預報，水相粒子的粒子濃度則由給定的粒徑譜進行診斷分析。但是實際觀測的雲微物理特徵顯示，水相粒子的粒徑譜會隨不同降水型態而改變，例如：基於相同降雨率的條件下，對流性降水會有較多的小雨滴，層狀性降水則有較多的大雨滴(Tokay and Short 1996)；然而single-moment的雲微物理參數化法難以表現此特徵，進而導致降水場的模擬誤差。為了改善single-moment雲微物理參數化法的上述缺陷，近年來許多科學家們發展一些新的理論(Cooper 1986; Verlinde et al. 1990; Walko et al. 1995)或進行雲微物理觀測實驗(Houze et al. 1979; Field et al. 2005; Ramanathan et al. 2001; Wang 2005; Khain et al. 2008)，對於雲微物理參數化法做了一些改進，增加降水粒子的粒子濃度預報，加上原有的質量混合比預報，發展為double-moment的雲微物理參數化方案(Ziegler 1985; Murakami 1990; Ikawa and Saito 1991; Wang and Chang 1993; Ferrier 1994; Meyers

et al. 1997; Reisner et al. 1998; Cohard and Pinty 2000; Seifert and Beheng 2001; Thompson et al. 2004; Morrison et al. 2005; Thompson et al. 2008; Hong et al. 2010), 以增加降水粒子粒徑譜隨時間變化之自由度, 改善雲微物理過程和輻射傳送的計算(Meyers et al. 1997)。許多double-moment的雲微物理參數化法, 並非對於所有種類的降水粒子都進行粒子濃度的預報, 例如: Reisner scheme僅針對雲冰 (Reisner et al. 1998)、Thompson scheme (Thompson et al. 2004) 僅針對雲冰和雨水的粒子濃度進行預報, WDM5、WDM6 (Hong et al. 2010) 僅針對暖雨過程的雲凝結核、雲水和雨水粒子濃度進行預報, WRF模式中的Morrison scheme (Morrison et al. 2005)則除了雲水的粒子濃度為診斷值之外, 其餘降水粒子皆有進行粒子濃度的預報。

除此之外, 許多科學家們也針對雲微物理參數化法進行敏感度測試, 或是將實際天氣個案的模擬與觀測資料進行比對和校驗。以下為一些敏感度測試的結果: Reisner et al. (1998)、Morrison and Pinto (2006) 和 Solomon et al. (2009) 的研究中發現模式中雪的粒子濃度以及雪的粒徑截距值(N_{0s})的不同會影響雲中水氣含量的變化; Thompson et al. (2008)指出 double-moment 雲微物理參數化法與 single-moment 相較之下, 改善了雲物理過程的處理, 理想化實驗顯示修改雲微物理參數化法對於雪的形狀與密度的假設, 會影響過冷水形成。接下來是與實

際觀測資料比對的一些前人研究成果：Gettelman et al. (2008)的研究中，將 Morrison scheme 使用在 CAM3 模式中，模擬出和觀測值相似的雲滴粒徑與粒子濃度，並且雨滴和雪的粒徑分佈模擬結果和觀測一致；Morrison et al. (2009) 的研究顯示，使用 double-moment scheme 模擬一個理想化的二維颶線系統，藉由預報雨滴的粒子濃度而使得蒸發率產生時空上之差異，進而合理地改善對流降水區與層狀降水區的降水場特徵；Solomon et al. (2009) 使用 double-moment 雲微物理參數化法模擬 M-PACE 實驗期間 2004 年 10 月 9 日~12 日間的極區混合相位(mixed-phase)雲系，其模擬雪的平均粒徑分布結果與觀測相似。

1-3 論文結構

第二章簡介觀測資料之來源；第三章概述本研究選取之個案及其綜觀環境分析，藉由地面天氣圖、高空天氣圖、衛星雲圖、斜溫圖與地面雨量累積圖來瞭解其大尺度特徵和降雨分佈；第四章包含 WRF 模式簡介與此模擬實驗的基本設定；第五章則從綜觀尺度環境場開始逐步縮小到雲微物理尺度，依序比較 WRF 模式模擬結果與實際觀測資料之異同；第六章為結論，總結說明本論文研究的成果。

第二章 資料來源與研究方法

2-1 資料來源

2-1-1 觀測資料之來源

本研究所使用的觀測資料有中央氣象局提供的 500hPa、850hPa 和地面的綜觀天氣圖、紅外線色調強化衛星雲圖、地面累積雨量、探空資料、七股雷達和墾丁雷達觀測資料，以及 SoWMEX 實驗期間的密集探空資料、NCAR S-pol 雷達觀測資料。

2-1-2 模式初始資料與邊界資料之來源

WRF 數值模擬所使用的初始資料和邊界條件的資料，來源為美國環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction; NCEP) 作業用的全球預報系統(Global Forecast System; GFS) 最終(Final; FNL)分析資料。

2-2 研究方法

本論文研究使用中尺度數值天氣預報的 WRF 模式，模擬 SoWMEX IOP-4 個案，它是一個伴隨梅雨鋒面之中尺度天氣系統，模擬時間為 2008 年 6 月 1 日至 6 月 4 日。採用每六小時一筆的 NCEP/FNL 資料做為模式初始場與邊界條件，選用六種不同的雲微物理參數化法做出六組模擬實驗，將模擬結果設為每小時輸出一筆資料，再利用模式輸出的模擬資料與觀測資料進行比對，以瞭解模式對於 SoWMEX IOP-4

個案的模擬能力；另外，本研究也針對六組模擬結果彼此間的差異進行比較與討論，希望能更深入瞭解 WRF 模式中不同雲微物理參數法在此降水個案所呈現的特性。

第三章 個案天氣分析

台灣每年梅雨季的天氣變化，主要是被兩個高壓系統的勢力消長所影響，分別為大陸蒙古高壓與太平洋副熱帶高壓。梅雨季時，蒙古高壓逐漸往北消退，而太平洋副熱帶高壓逐漸西伸，在此期間台灣地區的盛行風由東北風逐漸轉為西南風，二者的交會處則易形成移動緩慢或近似滯留的梅雨鋒面，再加上伴隨西南風而來的中尺度對流系統，常為台灣地區帶來大量降水。

本篇研究選取的個案發生於 2008 年 6 月 1 日至 2008 年 6 月 3 日，為 SoWMEX/TiMREX 實驗期間 IOP-4 個案。綜觀天氣圖的 500hPa 高度場(圖 3.1a~d)顯示這段時間有一槽線從中國大陸華中附近逐漸靠近台灣上空，並且此槽線在 2008 年 6 月 4 日 0000 UTC 時還在台灣的西邊；850hPa 的溫度場(圖 3.2a~d)顯示 18°C 等溫線一直維持在台灣南端附近，台灣西南方海面上的風場大致維持西南風，且東沙島的最大風速在 900hPa 左右達到 20m s^{-1} 左右(2008/6/2 1200 UTC)，表示本個案期間台灣西南方的海面上有小範圍低層噴流產生；從地面天氣圖(圖 3.3a~d)風切線判斷出來地面鋒面位置，持續滯留在台灣上空。滯留的梅雨鋒面加上與低層噴流的交互作用，可以提供豪雨發生的條件。中央氣象局的紅外線衛星雲圖(圖 3.4a~d)顯示與綜觀天氣圖一致的特徵，梅雨鋒面雲帶的位置於整個個案期間持續滯留在台灣上空，

並且 6 月 2 日至 6 月 3 日顯著發展出較高的雲頂以及更廣闊的範圍。

另外，地面累積降水圖(圖 3.5a,b)亦顯示 6 月 2 日和 6 月 3 日兩天的 24 小時累積雨量分佈圖，台灣西南部均達大雨等級(24 小時累積雨量達 50 毫米以上之降雨現象)，並且 6 月 2 日雲林、嘉義地區的降水更達豪雨等級(24 小時累積雨量達 130 毫米以上之降雨現象)。探空資料主要選取台灣西南部地區的屏東、恆春、六龜、台南永康探空站和代表上游風場的東沙島探空站，以及綠島探空站資料(探空站水平分佈見圖 3.6a)。於 IOP-4 期間，東沙島附近的環境在前期較潮濕(圖 3.7a,b)，後期轉為較乾燥的情形(圖 3.7c,d)，中低層(500hPa 以下)的風向維持西風到西南風，風速大概都維持在 10m s^{-1} 以上，甚至達到 25m s^{-1} (2008/6/3 0000 UTC)。然而台灣島上的探空(圖 3.8~3.11)，則風速較弱。整體而言，六龜站的探空最潮濕，中央山脈東側海面的綠島探空站最乾燥(圖 3.12)，配合地面累積降水和台灣地形資料(圖 3.6(b))，可得知 IOP-4 期間台灣西南部地區的降水偏向西南氣流與地形交互作用所導致的降水形態。

第四章 模式架構與實驗設計

本研究使用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式 v3.1.1 版本 (July 2009 Release)，WRF 是新一代的中尺度氣象數值模式，為完全可壓縮非靜力模式，其中包含了三維資料同化系統 (three-dimensional variational data assimilation, 3DVAR) 和四維資料同化系統 (four-dimensional variational data assimilation, 4DVAR)，並且可利用平行化運算來提高模式的計算效率。模式架構分為前處理系統、系統核心模組及後處理系統三大部分。它是由美國 NCAR (National Center for Atmospheric Research)、NCEP (the National Centers for Environmental Prediction)、FSL (Forecast System Laboratory)、AFWA (Air Force Weather Agency) 及 FAA (Federal Aviation Administration) 等單位的科學家們所共同發展。WRF 模式預期可模擬的天氣尺度涵蓋數公尺至數千公里的範圍，除了將其應用於真實天氣個案的模擬，亦可利用理想化模組做為基本物理過程探討的理論依據。

4-1 模式簡介

WRF 模式與 MM5 模式有許多的不同，其中在初始資料的處理以及交錯網格類型則敘述如下。WRF 模式的前處理系統可透過文字介面

(WPS)或是圖形介面(WRF SI)進行操作，處理在特定範圍內的地形、土地利用和地表性質等特性，再將全球模式經緯網格的氣象資料(如氣溫、氣壓、風速等)內插到WRF模式的網格中。MM5模式的處理方式需要經過TERRAIN、REGRID/RAWINS、INTERP 等的前處理(pre-processing)方式，轉換成系統模擬中心(MM5 model)可讀取格式。在WRF 模式裡可以利用WRF SI 代表這些前處理過程，直接整理成系統模擬中心(WRF model)所需要的網格格式 (圖4.1)，最後經由RIP、GRADS、Vis5D、NCL 等後處理(post-processing)軟體呈現出模式輸出的結果。在理想化模組(ideal case)中，WRF 模式可以跳過WRFSI 實際天氣個案的前處理步驟來直接計算，以模擬各種理想化模組的發展情形。此外，WRF模式在初始資料的處理過程中，亦可以使用資料同化系統將觀測資料同化至模式中，以改善初始猜測場。

WRF模式的網格設定是Arakawa-C網格，MM5模式則是使用Arakawa-B網格。Arakawa-C網格比Arakawa-B網格在重力波解析上更為優良。

本篇研究是利用WRF的真實個案模組，使用NECP /FNL大尺度分析場做為WRF模式的初始條件與邊界條件，以SoWMEX/TiMREX實驗期間的IOP-4個案進行數值模擬，並且分別使用四種Double-moment 雲微物理參數化法以及兩種single-moment雲微物理參數化法，針對降

水場進行敏感度測試。

4-2 實驗設計

模式初始場資料與邊界條件來自 NCEP/FNL 的每六小時一筆的分析場網格資料。其中水平網格間距為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，垂直方向從 10hPa 以下有 26 層，分別為 1000、970、950、925、900、850、800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300、250、200、150、100、70、50、30 和 10hPa。

模擬時間從 2008/6/1 1200 UTC 到 2008/6/4 0000 UTC，共 60 小時，積分時間間隔為 180 秒。模擬範圍的中心位置在 22.0°N , 120°E ，垂直方向分 32 層，水平分成四層巢狀網隔，水平網格間距由外而內分別是 45km、15km、5km 和 1.67km(圖 4.2)。網域一(D01)涵蓋整個東亞地區，網域二(D02)涵蓋華中至南中國海及台灣東方海域，網域三(D03)涵蓋大陸華南地區與台灣本島鄰近地區，網域四(D04)則涵蓋台灣中部和南部地區。

在物理參數化法選項方面，選用的積雲參數法(Cumulus parameterization)是使用 Grell-Devenyi ensemble scheme(2002)於粗網域(D01)和中網域(D02)，水平網格間距 5km 以下的細網域(D03 及 D04)已經相當程度能直接解析到對流的發生，所以不採用積雲參數法；

長波輻射參數法(long-wave radiation scheme) 採用 RRTM scheme(Mlawer et al., 1997)，短波輻射參數法(short-wave radiation scheme)採用 Dudhia scheme (Dudhia, 1989);邊界層參數法 (Boundary layer parameterization)使用 YSU scheme (Hong and Pan, 1996)。雲微物理參數化則分別選用六種不同的方法，並且只有在第三、四層網域中使用。其中有四種 Double-moment 方案：Morrison 方案、Thompson 方案、WDM5 方案、WDM6 方案，以及兩種 single-moment 方案：WSM5 方案、WSM6 方案。

4-3 雲微物理參數化法簡介

本論文研究共比較六種雲微物理參數化法模擬出來的降水場結果。

以下略述各方法之特性：

Morrison 方案(後簡稱為 MORI)：

其包含水蒸氣、雲水、雲冰、軟雹、雪、雨水等六種水相粒子。主要參數化方案架構與 Reisner 方案(Reisner et al. 1998)類似(Morrison et al. 2005)。

Morrison 方案的每一種水相粒子之粒徑分佈均為 gamma 函數，並且對五種水相粒子(水蒸氣除外)的粒子濃度皆進行預報，但是排除雪和軟雹的融化作用對於雨水的粒子濃度影響的計算。

此方案當初設計時以模擬極區的雲系為主要設計方向，強調合理的

雲凝結核(Cloud Condensation Nuclei; CCN)與冰核(Ice Nuclei; IN)條件設定之重要性，以及其對於長波、短波輻射的影響。

Thompson 方案(後簡稱為 THMN)

其包含水蒸氣、雲水、雲冰、軟雹、雪、雨水等六種水相粒子。以早期的 Reisner 方案(Reisner et al. 1998)作為基本架構，考慮混合相位的過程，容許過冷水和冰相粒子同時存在於溫度低於 0°C 的環境，亦容許雪在融化層上方就開始融化。Double-moment 的考量，僅針對雲冰(cloud ice)和雨水(rain)進行粒子濃度的預報。

Thompson 方案以改善凍雨事件的預報為主要目標，進行一些參數的修正，希望能提供較佳的飛航危險天氣警訊。此方法廣泛地應用在理想個案的測試比對，以及中緯度冬季真實觀測個案的整合。相對於 Reisner 方案而言，本方案主要的改進有以下幾點 (Thompson et al. 2004, Thompson et al. 2008)：

a. 冰核粒子濃度(N_i)的初始化，改由 Cooper (1986)曲線取代原本

Reisner 方案使用的 Fletcher(1962)曲線，以改善低溫環境下產生過多冰核粒子的情況。考慮冰核粒子濃度是溫度的函數。

b. 雪粒徑分佈的截距值(N_{0s})改為溫度的函數，原本在 Reisner 方案中此截距值設為雪的質量混合比之函數。雪粒徑分佈的設定也由原本的 Marshall-Palmer 的分佈改為冪次定律分佈(power-law

distribution)，此項修正是根據 Field et al.(2005)的中緯度層狀雲之觀測資料，冪次定律分佈會使小粒徑的雪粒子濃度增加、大粒徑的雪粒子濃度減少。

$$N_s(D) = \frac{M_2^4}{M_3^3} \left[\kappa_0 e^{-\frac{M_2}{M_3} \Lambda_0 D} + \kappa_1 \left(\frac{M_2}{M_3} D \right)^{\mu_s} e^{-\frac{M_2}{M_3} \Lambda_1 D} \right] \quad (1)$$

[為 Thompson et al. 2008 Eq(1)]

$$M_n = \int D^n N(D) dD \quad (2)$$

[為 Thompson et al. 2008 Eq (2)]

- c. 軟電粒徑分佈的截距值(N_{0g})改為軟電質量混合比的函數，原本在 Reisner 方案中此截距值設為常數。軟電粒徑分佈的形狀也從原本的指數分佈(exponential distribution)改為 gamma 函數的分佈。
- d. 雨水粒徑分佈的截距值(N_{0r})改為雨水質量混合比的函數，原本在 Reisner 方案中此截距值設為常數。此調整主要目的是讓雨滴粒徑分佈較能表現出毛毛雨(drizzle)的特徵，並且允許毛毛雨有較小的終端落速。因為大部分的 single-moment 的方案都假設雲滴(cloud drop)混合比達到特定的門檻值之後，立刻轉變為雨滴(rain drop)，但是在 Thompson 方案的假設是雲滴先轉換成毛毛雨之後才形成雨滴；此假設增加小雨滴在空中懸浮的時間，使其增加與其他水相粒子的交互作用。

WSM5 方案(後簡寫為 WSM5)

其包含水蒸氣、雲水、雲冰、雪、雨水等五種水相粒子(Hong et al. 2004)。此方法主要以 LFO83 和 RH84 為基礎架構，但是比 Purdue Lin 方案(LFO83)少了軟雹/冰雹這個種類的水相粒子，並且針對冰相雲微物理過程進行一些調整，主要修正如下：

a.將原本 Purdue Lin scheme(LFO83)中，合併處理的冰核粒子濃度(N_i)和冰晶(ice crystal)粒子濃度分開計算。

b.冰核粒子濃度(N_i)的初始化修改成 Fletcher (1962)曲線中的係數設定，以降低其對溫度的敏感度。

c.冰晶(雲冰)的粒子濃度原為溫度的函數，在 WSM5 方案中改為冰晶(雲冰)質量混合比的函數。相關的重要方程式如下：

$$N_{i,Fletcher} = 10^{-5} \exp[0.6(T_0 - T)] \quad (3)$$

[Fletcher 1962]

$$N_{i0} = 10^3 \exp[0.1(T_0 - T)] \quad (4)$$

[為 Hong et al. 2004 Eq (8)]

$$N_i = 5.38 \times 10^7 (\rho q_i)^{0.75} \quad (5)$$

[為 Hong et al. 2004 Eq (5c)]

d.採用 Heymsfield and Iaquinta (2000)對於冰晶(雲冰)終端落速的計算，並使其符合 Heymsfield and Donner (1990)的研究中對於冰晶(雲冰)平均落速的計算。原 Purdue Lin scheme 將冰晶(雲冰)終端落速設

為一定值(100cm s^{-1})。

$$V_i = xD_i^y \quad (6)$$

其中 $x = 1.49 \times 10^4$, $y = 1.31$

[Hong et al. 2004 Eq (5a)]

$$\bar{V}_i = 3.29(\rho_{q_i})^{0.16} \quad (7)$$

[Heymsfield and Donner 1990]

e.調整冰晶的質量計算方法，不再是僅與初始冰晶質量相關的關係式，而是使用與冰晶質量、粒子濃度的關係式皆存在一致性的關係式來表示。如下式所示：

$$\begin{aligned} \rho_{q_i}(\text{kg m}^{-3}) &= 4.92 \times 10^{-11} N_i^{1.33} \\ &= 8.38 \times 10^{30} M_i^4 \\ &= 2.08 \times 10^{22} D_i^8 \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $D_i(\text{m}) = 11.9M_i^{0.5}$, $M_i = \alpha D_i^\beta$

[Hong et al. 2004 Eq (5d)]

由於 N_i 的調整，相對於 RH84 而言，WSM5 方案可以使冰晶在較高溫的環境就開始形成，新的雲冰初始化計算在較高溫區的數值較大，表示有更多水汽凝華形成小冰晶。

f.調整小冰晶上的水氣凝華速率(Pisd)，將平均冰晶凝結粒徑值減小(由 $16.3 \mu\text{m}$ 改成 $11.9 \mu\text{m}$)，目的是為了配合新的 N_i 關係式，使水氣在低溫環境下以較慢的速率凝固在冰晶上(相對於 RH83 和 D89 而言)。

g.加入冰晶沉降的效果(LFO83 沒有考慮)，並將冰晶凝聚(aggregation)

於雪的凝聚效率改為溫度的函數，原本 LFO83 的凝聚效率設為定值。此調整造成溫度越高時，冰晶凝聚於雪的效率越高；反之，則效率越低。

h. 因應 Ni 關係式的改變，調整冰晶轉換成雪的門檻值(autoconversion)，造成在溫度較低的環境下，會較抑制自動轉換(autoconversion)的效果。

i. 調整雪粒徑分佈的截距參數(N_{0s})，WSM5 scheme 根據 Houze et al.(1979)的觀測資料將 N_{0s} 調整為：

$$N_{0,s} = 2 \times 10^6 \exp[0.12(T_0 - T)] \text{ m}^{-4} \quad (9)$$

原本 LFO83 和 RH84 設定 N_{0s} 為定值 ($N_{0,s} = 2 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$)，相當於(9)式溫度為 -19.5°C 時的數值。此(9)式調整造成越低溫的條件下會使 N_{0s} 變得越大，增加雪的粒子濃度，進而增強雪的凝聚、凝華和昇華之速率，並且減少經由減小平均粒徑的雪積聚物(snow aggregates)之沉降。

j. 因應雪粒徑分佈的截距參數改變，調整雨水蒸發造成雪的昇華或凝華的變化速率(Pres)。當溫度較低時， N_{0s} 值變大，使得 Pres 值變小。

k. 調整雲水自動轉換成雨水的關係式，原使用 Kessler (1969)的公式現改為 Tripoli and Cotton (1980,簡稱為 TC80)的公式。

綜合而言，WSM5 方案主要調整項包括 1)根據 Houze et al.(1979)

重新定義雪粒徑分佈的截距， N_{0s} 由定值改為溫度的函數；2)重新定義冰晶(雲冰)的粒子濃度值是藉由冰晶(雲冰)的質量透過診斷關係式而得；3)調整冰核的診斷關係式；4)調整相關的冰相物理過程；5)雲水轉換成雨水的自動轉換(autoconversion)關係式改用 TC80 的計算；6)新加入冰晶沉降過程的計算。

WSM6 方案(後簡寫為 WSM6)

其包含水蒸氣、雲水、雲冰、軟雹、雪、雨水等六種水象粒子(Hong and Lim 2006)。

WSM6 方案是利用 WSM5 方案發展而來，最大的不同是 WSM6 方案新加入了軟雹(gaupel, Hong and Lim 2006)。而軟雹的微物理過程主要根據 LFO83 和 RH84 的研究結果。不過從一些模擬實驗結果顯示，WSM6 方案傾向於產生過多的小雨(Shi et al. 2007)。

WDM5 方案(後簡寫為 WDM5)

其包含水蒸氣、雲水、雲冰、雪、雨水等五種水象粒子(Lim and Hong 2009)。基本架構和 WSM5 相同，但增加了雲凝結核、雲水和雨水的粒子濃度之預報。

WDM6 方案(後簡寫為 WDM6)

其包含水蒸氣、雲水、雲冰、軟雹、雪、雨水等六種水象粒子(Lim and Hong 2009)。WDM6 基本架構和 WSM6 類似，兩者的冰相雲微

物理過程大致上相同，但是 WDM6 在暖雨過程中引入 Double-moment 的處理，預報的物理量多了雲水(cloud water)和雨水(rain water)的粒子濃度。另外，雲凝結核(cloud condensation nuclei, CCN)的活化過程亦加入 WDM6 方案，用來活化雲水的產生。

WDM6 方案和其他 Double-moment 方案的主要差異如下：

雲凝結核的粒子濃度在 WDM6 方案中為預報值，在 MORI 方案和 THMN 方案中則為定值。雪和軟雹的粒子濃度在 WDM6 中為診斷值。

第五章 模式結果

本章為 WRF 模式模擬結果，部分模擬結果會與觀測資料做比對，用來瞭解模式資料和觀測資料之間的差異，包括綜觀環境的模擬、模式探空資料和觀測分析資料比較；另有部分的模擬結果，僅比較使用不同的雲微物理法所造成的差異。

5-1 綜觀環境模擬(D01；45 公里網域)

本小節分別比較 WRF 模式預報 500hPa 槽線位置(圖 5.1)、850hPa 溫度場(圖 5.2)和地面鋒面位置(圖 5.3)，皆與中央氣象局的綜觀天氣分析場特徵十分接近。但是 WRF 模式模擬之 850hPa 的風場風速偏弱，可能是因為 NCEP/FNL 資料的解析度較粗，無法解析小範圍的強風帶，造成初始場的上游風速較小。

5-2 探空資料之校驗(D03)

圖 5.4 為模式模擬之東沙島探空。WRF 模擬的東沙島溫度曲線和東沙島觀測探空資料(圖 3.7)的變化趨勢一致，同樣呈現前期較潮濕、後期轉為較乾燥之特徵；中低層風向亦維持西南風或西風，但是模式的低層風速值比東沙島探空觀測到的風速小，700 百帕以下的平均風速大約是觀測值的 70%左右(表 1)。

圖 5.5 為屏東站模式探空，若與觀測探空(圖 3.8)比較，風場的特

徵(風向與風速)相似，但 6 月 3 日 0000UTC 的溫度曲線顯示模式此時的環境場較實際探空潮濕。圖 5.6 顯示恆春站之模式探空與觀測探空(圖 3.9)比較，在風場或溫度曲線特徵都很接近。圖 5.7 為六龜站模式探空，若與觀測探空(圖 3.10)比較，顯示模式探空的中層較為潮濕，但是觀測資料普遍呈現(700hPa 以下)底層較潮濕的狀態。圖 5.8 為台南站模式探空，若與觀測探空(圖 3.11)比較，大致上環境場特徵類似，但是模式探空資料 6 月 3 日的溫度曲線呈現較乾燥的環境場。

圖 5.9 為綠島站模式探空，一般而言，其與觀測探空(圖 3.12)之環境場皆比前述四個西南部的探空測站(圖 3.9~3.11)更為乾燥。單以綠島站的探空資料而言，WRF 模式模擬的溫度曲線皆顯示比觀測溫度曲線(圖 3.12)還略為潮濕的特性，另外模式的近地層風場亦較紊亂。

就探空資料的觀測與模擬結果比較而言，位於上游風場的東沙島探空站其觀測資料與 WRF 模式結果的比較，發現模式模擬出較小上游風速，此現象可能會減少水氣往台灣西南方陸地上的輸送，而使得模式降水量偏少。就台灣西南部四個陸上的探空站而言，模式與觀測的風場特徵類似，偏南的恆春站和屏東站 WRF 模擬之溫度曲線與觀測溫度曲線相似，甚至有較為潮濕的情形；反之，偏北的六龜站和台南站，模式的環境場比觀測環境場較為乾燥，這個現象也許與上述 WRF 模式對於西南氣流上游風速偏弱有關。

5-3 模式降水系統與觀測降水系統的演變之對照

為了比較模式降水系統與觀測降水系統對於台灣西南部地區的降水系統之演變，模擬降水系統的演變以第三層網域 1km 高度的模擬雷達回波水平分佈做為判斷；觀測降水系統的演變則利用七股雷達回波 (0.5° 仰角掃描為主、 1.4° 仰角掃描為輔) 的觀測結果做判斷。以上述方式判斷出來在 IOP-4 期間，大致有兩波降水系統經過台灣西南方的陸地。

圖 5.10a 為第一波降水系統即將登陸時的模擬結果(較觀測降水系統約提早 5 小時登陸)，圖 5.10b 為相對應的時間點之七股雷達觀測結果；圖 5.10c 為第一波降水系統登陸後的模擬結果(較觀測提早約 5 小時)，圖 5.10d 為相對應的時間點之雷達觀測結果；圖 5.10e 為第一波降水系統消散時(較觀測約提早 8 小時)的模擬結果，圖 5.10f 為相對應的時間點之雷達觀測結果。

圖 5.11a 為第二波降水系統即將登陸時(較觀測落後 1.5 小時)的模擬結果，圖 5.11b 為相對應的時間點之雷達觀測結果；圖 5.11c 為第二波降水系統登陸後的模擬結果，圖 5.11d 為相對應的時間點之雷達觀測結果；圖 5.11e 為第二波降水系統亦為登陸後的模擬結果，圖 5.11f 為相對應的時間點之雷達觀測結果，此時觀測和模擬皆顯示主要雲雨

帶往南移的特徵；圖 5.11g 為第二波降水系統消散時的模擬結果，圖 5.11h 為相對應的時間點之雷達觀測結果。

透過模式與觀測資料的比對，可大致找出兩波降水系統的演變過程，如圖 5.12 所示。觀測資料觀察到的第一波降水系統大致於 2008 年 6 月 1 日 1900 UTC 於台灣西南方的海面上開始發展，約 10.5 h 之後在 6 月 2 日 0530 UTC 左右逐漸登陸台灣西南部陸地，又經過 7.5 h 左右於陸地上消散；第一波降水系統大致於 2008 年 6 月 2 日 1900 UTC 於台灣西南方的海面上開始發展，約 2.5 h 之後在 6 月 2 日 2230 UTC 左右登陸台灣西南部陸地，又經過 14 h 左右於陸地上消散。WRF 模式結果呈現的第一波降水系統大致於 2008 年 6 月 1 日 1600 UTC 於台灣西南方的海面上開始發展，約 7 h 之後在 6 月 1 日 2300 UTC 左右逐漸登陸台灣西南部陸地，又經過 6 h 左右於陸地上消散；第二波降水系統大致於 2008 年 6 月 2 日 1800 UTC 於台灣西南方的海面上開始發展，約 5 h 之後在 6 月 2 日 2300 UTC 左右登陸台灣西南部陸地，又經過 12 h 左右於陸地上消散。

第一波降水系統的雲雨帶在系統演變上較為連續，第二波降水系統的雲雨帶在時間或空間演變上都較為分散。

5-4 第三層網域降水分佈之校驗

模式的地面累積降水以 5-3 小節中所區分出來第一波降水和第二波降水發生的時段，並與觀測降水的累積時間對照，選取相對應的時間點進行計算。模式的第一波降水系統降水量累積時段為 2008 年 6 月 1 日 1200 UTC~6 月 2 日 1200 UTC，觀測累積時段為 2008 年 6 月 1 日 1600 UTC~6 月 2 日 1600 UTC，均涵蓋第一波降水系統雲系通過台灣陸地的整個時段；模式的第二波降水系統降水量累積時段為 2008 年 6 月 2 日 1600 UTC~6 月 3 日 1600 UTC，觀測累積時段為 2008 年 6 月 2 日 1600 UTC~6 月 3 日 1600 UTC，亦大致涵蓋第二波降水系統雲系通過陸地的時間。

5-4-1 第一波降水系統的降水分布

圖 5.13 是 WRF 分別使用六種雲微物理方案，所產生的第三層網域 24 小時地面累積降水的模擬結果。觀測資料(圖 3.5a)顯示 6 月 2 日台灣地區有三個範圍較廣的大量降水區，分別位於雲林嘉義一帶、中央山脈西南側山坳前的高雄屏東地區以及花蓮沿岸地區。MORI、THMN、WSM5、WSM6 和 WDM6 方案皆有模擬出高屏地區以及花蓮一帶的降水分佈，不過 WSM6 和 WDM6 方案模擬出來高屏地區的降水，該區之極值主要發生在海上；WDM5 方案有模擬出高屏一帶的降水分佈，但是東部的降水區域則是在海上；另外，中台灣的降水區在

MORI 實驗、THMN 實驗模擬位置偏內陸，WSM5 實驗、WSM6 實驗、WDM6 實驗模擬的降水位置偏海上，WDM5 實驗的降水位置和觀測最相近。六種雲微物理法模擬出來的降水量都明顯少於觀測值。

圖 5.14a 是 WSM5 實驗和 WDM5 實驗的 24 小時地面累積降水差值之空間分佈，顯示東部和高屏兩個主要降水區的模擬以 WSM5 實驗的降水量較多；圖 5.14b 是 WSM6 實驗和 WDM6 實驗的 24 小時地面累積降水差值之空間分佈，顯示中部、東部和高屏三個主要降水區的模擬皆是 WSM6 實驗的降水量較多。再比較 WSM5 實驗和 WSM6 實驗的降水差異(圖 5.14c)，中部和高屏地區以 WSM5 實驗降水較多，東部的陸上降水值無明顯差異；WDM5 實驗和 WDM6 實驗的降水差異主要發生在中部和高屏地區，以 WDM5 實驗的降水較多(圖 5.14d)。

圖 5.15 是各種雲微物理法的第三層網域(水平網格間距為 5 公里)之 24 小時平均地面累積降水，WSM5 實驗的平均降水量最多，再來是 WSM6、WDM5、WDM6、MORI、THMN 實驗依序遞減。圖 5.16 是第四層網域(水平網格間距為 1.67 公里)之 24 小時平均地面累積降水，降水量由多而少依序是 WSM5 實驗、WSM6 實驗、THMN 實驗、MORI 實驗、WDM5 實驗，最少的是 WDM6 實驗。

5-4-2 第二波降水系統的降水分布

圖 5.17 顯示六種雲微物理法的模擬結果，皆與實際觀測(圖 3.5(b)) 的降水分布差距很大，表示 WRF 模式在 IOP-4 的個案中，模擬到 20 多小時以後的動力場和熱力場可能已經與真實大氣的狀態有相當程度上的差異。

經過上述降水分布的 WRF 模式結果與觀測資料之校驗，得知模式對於第一波降水系統的掌握程度較高，因此後續更小尺度的模式結果僅針對第一波降水系統做分析，以及與觀測資料的細部比較。

5-5 第四網域雷達回波之比對

由於後續的論文結果討論中要比較對流性降水與層狀性降水的垂直結構差異，因此圖 5.18 為兩種降水系統結構差異的示意圖(取自 Houze 1997)。圖中表示對流降水系統之雷達回波，有明顯的垂直發展(圖 5.18c)，整個對流層內以上升氣流為主(圖 5.18a)；層狀降水系統之雷達回波於融解層有明顯亮帶(圖 5.18f)，回波於水平方向較為均勻分布，垂直速度於融解層以上主要為上升氣流，於融解層以下則主要為下降氣流(圖 5.18d)。

圖 5.19 顯示 NCAR S-pol 雷達觀測到的第一波降水系統主要雲帶

移入之過程。2008 年 6 月 2 日 0430 UTC 先有一波呈線狀的對流雲系移進(圖 5.19a)，之後 0731 UTC 有較大範圍的主要雲系接著登陸(圖 5.19b)，0824 UTC 時回波轉弱逐漸轉為層狀降水的特徵(圖 5.19c)，到了 0946 UTC 時大致上雲系已消散(圖 5.19d)。

圖 5.20 為 MORI 實驗相對應時間之模擬的雷達回波；圖 5.21 為 THMN 實驗的模擬結果；圖 5.22 為 WSM5 實驗的模擬結果；圖 5.23 為 WDM5 實驗的模擬結果；圖 5.24 為 WSM6 實驗的模擬結果；圖 5.25 為 WDM6 實驗的模擬結果。六種雲微物理法模擬的回波演變過程大致上與 S-pol 雷達觀測的特徵雷同，即初始為線狀對流，而登陸後對流強度減弱但層狀降水面積擴大；WSM5 實驗和 WDM5 實驗模擬的降水系統在陸地上維持時間較長，WDM5 實驗、WDM6 實驗的模擬回波有較多對流性的特徵。

5-6 垂直速度平均場(D04)

圖 5.27 為 WRF 模式第四層網域的垂直速度取東經 $120.0^{\circ} \sim 120.9^{\circ}$ 、北緯 $21.9^{\circ} \sim 23.0^{\circ}$ 的水平範圍(即圖 5.26 的綠色方框範圍)，利用垂直速度做空間平均之高度-時間序列的結果。MORI、THMN、WSM5、WDM5 實驗的中低層最大上升速度都發生在 6 月 2 日 0000 UTC 左右，WSM6 和 WDM6 實驗的發生時間約在 6 月 1 日 2300 UTC，比起另外

四種雲微物理法更提早一小時，並且上升運動的平均值也比其他雲微物理法的數值小。若配合第四網域的雷達回波水平分布圖(圖 5.20~5.25)來分析，會發現中低層平均最大上升運動發生的時間點，是在第一波降水系統正在登陸或是即將登陸、回波前緣剛抵達西南部的海岸線附近的時候，此時雷達回波圖上的垂直對流特徵最顯著。

然而第一波降水系統登陸後，在一、二小時之內逐漸由對流性降水結構轉為層狀降水結構，六種雲微物理法的平均垂直速度皆模擬出從強上升氣流轉為較弱的下沉氣流。MORI 實驗和 WDM6 實驗在融化層 (~5km) 下方產生較明顯的下沉氣流，區域平均下沉速度達 -0.05 cm/s 以上；WSM6 實驗和 WDM6 實驗的下沉氣流維持時間較長。

另外，在平均最大上升氣流且中低層轉為弱下沉氣流發生之後，MORI 實驗、THMN 實驗、WSM5 實驗、WDM5 實驗於高層大氣又出現了一個明顯的上升氣流，最大垂直速度的發生高度約在 10~12km，WSM6 產生的上升氣流與前述四個雲物理法的結果相比較弱，而 WDM6 實驗在此時的上升氣流並不明顯。

整體來說，在第一波降水系統發生的期間，MORI 實驗、THMN 實驗、WSM5 實驗、WDM5 實驗的平均垂直速度場特徵類似，並且垂直速度較大；WSM6 實驗、WDM6 實驗的特徵類似，平均垂直速度較小。

5-7 雲微物理特徵之校驗

最後同樣選取降水系統登陸後偏對流降水結構和層狀降水結構的兩個時間點的模擬結果進行垂直剖面分析，並配合 NCAR S-pol 雙偏極化雷達的觀測雷達回波資料和 S-pol 提供的降水粒子分類(Particle Identification; PID)辨識結果，進行定性上的比較。

由於本研究中 WRF 模式結果輸出每一小時一筆資料，考慮模擬降水系統與觀測降水系統的移速不盡相同，無法準確取得與觀測資料相對應時間點的模式輸出結果，因此盡可能選取最相近的逐時 WRF 結果，以進行模式輸出與觀測結果的比對分析。

模擬結果的垂直剖面以 S-pol 雷達為基準點 A(北緯 22.52693°，東經 120.4345°)、正北方為 0°(角度往順時針方向增加)，分別和 B(北緯 23.5°，東經 121.0°)及 C(北緯 23.0°，東經 121.5°)兩點連線，方位角約分別為 30°和 60°(圖 5.26)。然而中小尺度的天氣系統，在時間和空間上的變化比較大，為了避免僅選取單一時間點、特定角度的剖面資料，可能會只取到降水系統發展特別旺盛或特別微弱的部分，所以加入 AB、AC 連線左右側各 8.35 km，寬度總共 16.7 km 的資料，取其雷達回波側向平均值、垂直速度側向平均值、水相粒子混合比側向平均值與融化層以上的溫度側向平均值，以增加剖面分析結果之代表性。

5-7-1 降水系統中對流降水區的垂直雷達回波特徵

圖 5.28 是 S-pol 雷達於 2008 年 6 月 2 日 07:29:49UTC、方位角 60° 的 RHI (range-height indicator) 雷達回波觀測資料。圖中水平距離 S-pol 雷達 10~17 公里左右有明顯的對流區，但是由於觀測資料的限制，無法得知對流區的回波頂層發展的高度。最大回波值達 50dBz 以上。

圖 5.29 是沿圖 5.26 AC 剖面，以各雲微物理方案所模擬之雷達回波和垂直速度側向平均之垂直剖面圖，雷達回波的色階間距是 3dBz，垂直速度的等值線間距 30cm s^{-1} ，實線表正的垂直速度(上升氣流)，虛線為負的垂直速度(下降氣流)。

圖 5.29 中高度 5km 左右的零值線是 0°C 等溫線，代表融化層所在位置。圖中左側的雷達回波為主要分析目標，MORI 實驗和 THMN 實驗最大回波值大約有 40dBz，WSM5 實驗、WDM5 實驗、WSM6 實驗及 WDM6 實驗最大回波值則有 45dBZ。雷達回波頂的高度大致都發展到達 14km。

主要對流發生區同時也是主要上升氣流區，圖中可判斷的最大上升速度：THMN 實驗 174.7 cm s^{-1} 、WSM5 實驗 216.7 cm s^{-1} 、WDM5 實驗 $>120\text{ cm s}^{-1}$ 、WSM6 實驗 200.9 cm s^{-1} 、WDM6 實驗 136.2 cm s^{-1} 。

5-7-2 降水系統中對流降水區的垂直降水粒子分佈特徵

圖 5.30 是 S-pol 雷達 2008 年 6 月 2 日 07:29:49UTC、方位角 60° 的 PID (Particle Identification) 辨識結果。圖中顯示對流區的融化層附近存在溼雪與軟雹，融化層上方也有軟雹出現，再往上則為乾雪，10 km 以上主要是冰晶。

圖 5.31 為圖 5.26 AC 垂直剖面的降水粒子平均混合比和溫度分佈圖，灰階的部分為溫度場，每隔 5°C 加深一灰階；等值線的部分，紫色是雲冰混合比、藍色是雪混合比、綠色是軟雹混合比、紅色是雨水混合比。

MORI 實驗的大量的雲冰主要分佈在溫度低於 -35°C、高度 10 公里以上的區域；THMN 實驗的雲冰偏少，故較難判斷雲冰分佈的特性；WSM5 實驗、WDM5 實驗、WSM6 實驗、WDM6 實驗在融化層以上到最頂層皆有雲冰分佈。六種雲微物理方案模擬的雪主要分佈在融化層以上，融化層下方很少有雪的分佈。有模擬軟雹的四種微物理方案中，其軟雹分佈在融化層上方與雪的分佈較相近，但是融化層下方，甚至到高度 3~4km 仍有軟雹出現。六種雲微物理法對於雨水的模擬結果，皆在融化層下方為主要分佈區，但是 WSM5 實驗、WDM5 實驗於主要對流區高度 5~7 公里處仍有較大的過冷雨水質量混合比，然而 WDM6 實驗在對流區也有雨水分佈高度較高之趨勢。

5-7-3 降水系統層狀降水區的垂直雷達回波特徵

圖 5.32 是 S-pol 雷達 2008 年 6 月 2 日 07:50:55UTC、方位角 32° 的 RHI (range-height indicator) 回波觀測結果。圖中顯示雷達回波的亮帶(bright band)發生在高度 5km 左右，最大回波值約為 50dBz，回波頂層高度約為 11km。

圖 5.33 是圖 5.26 AB 剖面的各種雲微物理方案模擬之雷達回波和垂直速度平均圖，雷達回波的色階間隔是 3dBz，垂直速度的等值線間隔 20cm s⁻¹。六種雲微物理法模擬的雷達回波亮帶較不明顯，回波最大值大約為 33~36 dBz 左右，回波頂的高度：MORI 實驗結果約 12 公里高、THMN 實驗結果約 13 公里高、WSM5 實驗結果約 13 公里高、WDM5 實驗結果約 14 公里高、WSM6 實驗結果約 12 公里高、WDM6 實驗結果約 9 公里高。層狀區的融化層下方皆有微弱的下沉氣流，融化層上方則有較強的上升氣流。

5-7-4 降水系統層狀降水區的垂直降水粒子分佈特徵

圖 5.34 是 S-pol 雷達 2008 年 6 月 2 日 07:50:55UTC、方位角 32° 的 PID (Particle Identification) 演算資料。圖中顯示融化層附近存在溼雪與小範圍的軟雹，融化層上方是乾雪，高度約 9 公里以上主要為冰晶。

圖 5.35 為圖 5.26 AB 剖面的各種雲微物理方案模擬之降水粒子平

均混合比和溫度分佈圖。不同雲微物理方案模擬之冰晶分佈高度的特性和對流降水區的模擬結果類似，MORI 實驗和 THMN 實驗同樣傾向在高層有較多的冰晶；然而，相對於對流區的結果，WSM5、WSM6、WDM5 及 WDM6 實驗在層狀降水區的模擬冰晶空間分佈較均勻，並且有較大的混合比。THMN、WSM5、WDM5 與 WSM6 實驗的雪分佈高度和對流降水區特徵相似；MORI 實驗在層狀降水區的雪分佈高度最高約 13 公里，於對流降水區最高達 15 公里以上。相對於對流降水區，層狀降水區的軟雹和雪的分佈特性更為一致，並且最低的軟雹大概只出現到 4 公里左右的高度，但是仍比 S-pol 資料顯示的高度還低一些。與對流降水區的結果相比，六種雲微物理法模擬出來的雨水分佈高度較為一致，都分佈於 5 公里高的融化層下方。

5-8 混合比平均場(D4)

圖 5.36 與垂直速度平均場(圖 5.27)一樣取圖 5.26 綠色方框區域內(第四網域內北緯 $21.9^{\circ} \sim 23.0^{\circ}$ 、東經 $120.0^{\circ} \sim 120.9^{\circ}$)，各類水相粒子做水平空間平均後之高度剖線分佈圖。每一種雲微物理法的實驗結果皆選取兩個時間點進行計算，參照第四網域的水平雷達回波圖(圖 5.20~5.25)作時間點的挑選，以第一波降水系統剛登陸，結構偏向對流性降水特徵的時間為第一個時間點；降水系統登陸後一至兩小時漸

轉為偏層狀性降水特徵的時間為第二個時間點。

5-8-1 冰相粒子

雲冰混合比的垂直分佈在 WSM5、WDM5、WSM6 及 WDM6 實驗均呈現類似的特徵，從融化層(~5km)上方開始形成，最高發展到 16 公里左右，其間 6~14 公里處是雲冰混合比最多的區域，但是隨高度變化不大。MORI 實驗的雲冰混合比主要分佈在 10~16 公里處，傾向產生在高層(圖 5.36a,b)。THMN 實驗的雲冰混合比在兩個時間點都非常少(圖 5.36c,d)。

雪的混合比在 WSM5 實驗(圖 5.36e,f)、WDM5 實驗(圖 5.36g,h)、WSM6 實驗(圖 5.36i,j)及 WDM6 實驗(圖 5.36k,l)結果中呈現類似垂直分佈特徵，在降水系統偏層狀系統的時間點均有較大的混合比。MORI 實驗(圖 5.36a,b)的雪混合比在兩個時間點的差距不大。THMN 實驗(圖 5.36c,d)傾向產生最多的雪混合比，並且兩個時間點的混合比量值相當。

有考慮軟雹的雲微物理法中，軟雹混合比的變化皆顯示降水系統偏對流性時，軟雹的質量較多，降水系統偏層狀性時，軟雹的質量變少；此特性以 MORI 實驗(圖 5.36a,b)和 WDM6 實驗(圖 5.36k,l)的變化較為顯著，WSM6 實驗(圖 5.36i,j)變化幅度較小。THMN 實驗(圖 5.36c,d)傾向產生較少的軟雹。

5-8-2 水相粒子

雲水混合比的平均結果，以 MORI 實驗(圖 5.36a,b)和 THMN 實驗(圖 5.36c,d)特徵相似，WSM5 實驗(圖 5.36e,f)、WSM6 實驗(圖 5.36i,j)傾向在降水系統偏對流結構時產生較大的雲水混合比，WDM5 實驗(圖 5.36g,h)、WDM6 實驗(圖 5.36k,l)亦呈現此特徵，但是量值明顯比 WSM5 實驗、WSM6 實驗小。

雨水混合比的部分，MORI 實驗和 THMN 實驗的數值較小，並且在 4 公里左右的高度有最大值發生，隨高度往下遞減或維持相同的大小。WSM5 實驗、WSM6 實驗的特徵相似，在第一個時間點(對流性降水)的雨水混合比隨高度向下遞增；WDM5 實驗、WDM6 實驗的特徵相似，最大值都發生在 4km 左右，4km 以下的雨水混合比隨高度遞減，並且 WDM6 實驗在兩個時間點(對流性降水與層狀性降水)的雨水混合比差異最明顯。另外，WSM5、WDM5 實驗於 5~8 公里的雨水混合比，明顯高於其他四種雲微物理法的雨水混合比，是一個值得注意的現象。

MORI 方案對於所有降水粒子雲微物理過程都以 Double-moment 的方式來預報，明顯地區分出對流性結構和層狀結構中降水粒子混合比垂直分佈之差異。

THMN 方案僅針對雲冰進行 Double-moment 的處理，傾向於產生最多的雪以及最少的軟雹、雲冰，推測其原因是雪的粒徑分佈設定為 power-law，容許較多小粒徑的雪存在，使得雲冰更容易達到自動轉換的門檻值而形成雪；並且其雨水粒徑分佈截距的設定容易產生較多的毛雨，間接增加與雪交互作用的機會，可能使雪的質量增加。

WSM5、WDM5、WSM6、WDM6 這四種雲微物理方案的冰相粒子的雲微物理過程都是以 single-moment 的方式計算，造成冰相粒子(雲冰、雪)的混合比平均場之雲微物理特徵顯示相似的特徵，與其雲微物理參數法的基本設定相符。然而在液態降水粒子即雲水、雨水的混合比方面，則顯著地呈現出 Single-moment 方案(WSM5、WSM6)和 Double-moment 方案(WDM5、WDM6)的差異，並且與另兩個 Double-moment 方案(MORI、THMN)的結果較為類似。

5-9 混合比時空平均場

最後檢視第四網域中選定區域內水相粒子混合比的時空平均值隨高度分布之特性(圖 5.37)，以瞭解六種雲微物理法在第一波降水系統中整體表現的定性特徵。此處的時空平均計算的選定範圍敘述如下：在時間上為 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 6 月 2 日 1200UTC，這段時間內涵蓋模式模擬的第一波降水系統的整個生命期，與圖 5.14 的 24

小時地面累積降水選取的時間範圍相同；空間上的範圍為圖 5.26 方框內之水平區域，與 5-6 小節垂直速度平均場和 5-8 小節第四層網域混合比平均場的選取範圍相同。

這六種雲微物理法依照混合比的時空分布特徵，又可大致區分為三組，第一類為 MORI 實驗(圖 5.37a)、第二類為 THMN 實驗(圖 5.37b)，和囊括 WSM5 實驗(圖 5.37c)、WDM5 實驗(圖 5.37d)、WSM6 實驗(圖 5.37e)、WDM6 實驗(圖 5.37f)的第三類。

這三大類的雲微物理法最為一致的特性是雪混合比隨高度有兩個峰值，較高層的峰值出現在 12~13 公里左右，較低層的峰值出現在 6~7 公里左右。然而其細部的區別，較高層的峰值可能和雲冰混合比的峰值有關。除了 THNM 實驗的雲冰混合比很小，不容易討論其影響之外，另外兩類的雲冰混合比皆在 12~13 公里處形成峰值，直接或間接透過自動轉換、聚合、碰撞和沉降等過程，造成在這個高度層有較多的雪產生。低層的雪混合比峰值則可能與軟雹的分布有關。在有預報軟雹的雲微物理法的實驗中(MORI、THMN、WSM6 及 WDM6 實驗)，三類的軟雹混合比峰值出現高度皆位於雪混合比低層峰值的下方約 1~2 公里處，同時預報雪和軟雹粒子濃度的 MORI 實驗和不計算軟雹的 WSM5、WDM5 實驗一樣有較大的雪混合比低層峰值。若對照 WSM6 實驗、WDM6 實驗的結果，推測 WSM5 實驗、WDM5 實驗是

因為缺少軟雹相關的雲物理過程而造成較大的雪混和比低層峰值，WSM6 實驗和 WDM6 實驗則是有部分的雪透過積聚或自動轉換成軟雹的雲物理過程被消耗，因此使低層雪混合比的峰值變得較小。與其他兩類的結果相比，THMN 實驗產生最大的雪混和比，並且其高層峰值和低層峰值的大小相當，推測與 THMN 對於雪使用 power-law 粒徑分布譜型有關。因為其他的參數法對雪的粒徑分佈大多採用指數型分佈或類似的 gamma 函數分佈，這是 THMN 對雪的處理與其他方法最大的差異所在。並且 THMN 實驗的軟雹混和比很小，表示 THMN 實驗的雪較不易轉換成較大的軟雹，或是不易提供軟雹增長所需的質量；另外 THMN 對毛毛雨的設定，也可能是間接造成雪混合比低層峰值的因素之一。

雲水在每個模擬結果中，皆為混合比很小的水相粒子，並且分布特徵均相似，表示六種雲微物理法對雲水的處理方式，採用 single-moment 或是 double-moment 的結果差異並不明顯。

雨水的混合比以 MORI 實驗、THMN 實驗、WSM5 實驗和 WSM6 實驗的分佈較類似，THMN、WSM5、WSM6 的雨水均以 single-moment 的方式處理，因此能合理地表現出於高度上相似的分佈特徵。WDM5 實驗、WDM6 實驗則越靠近低層的雨水混合比越少，推測因為降水作用逐漸移除雨滴，使得雨水粒子濃度變小，減少與其他水相粒子的交

互作用，並增加雨水消耗的效率，進而反映出雨水質量混合比減少的現象。

儘管透過時空平均的計算，可以定性上瞭解六種雲物理參數化方案對於各類水相粒子模擬的趨向，但是這部份仍需要加強與觀測資料的比對，才能更明確的找出最符合此梅雨季降水個案雲物理特性的雲微物理參數法。

第六章 總結

本論文研究目的為欲瞭解 Single-moment 及 Double-moment 雲微物理參數化方法對於 SoWMEX IOP-4 個案降水模擬之敏感度情況，並且針對在高屏一帶主要降水區的雲物理特徵與 S-pol 雷達觀測資料進行比對，著重在定性特徵的比對，並非強調哪一種雲微物理法是最優異的。

在總結論文研究結果之前，有幾點必須注意的前提。首先，造成降水模擬差異的原因並非只有雲微物理參數化法，模式本身的數值方法、計算誤差的累積、各種不同尺度間的交互作用，以及許多非線性的物理過程，也都可能影響降水模擬結果的差異。當大尺度的動力或熱力條件與真實大氣有偏差時，更容易增加降水模擬的差異。其次，SoWMEX 實驗雖然提供了高時間、空間解析度的觀測資料，但是也必須留意觀測誤差對於結果分析的影響；另外，本研究所使用 S-pol 提供的降水粒子分類(PID)資料是透過雷達雙偏極化參數經由模糊邏輯演算的結果，亦可能發生一些分類判斷上的誤差。

本論文研究使用 WRF 模式 3.1.1 版針對 SoWMEX 實驗期間的 IOP-4 個案進行降水模擬的敏感度研究，分別使用 MORI、THMN、WSM5、WDM5、WSM6 和 WDM6 方案等六種雲微物理參數化法進行模擬比較。WRF 模擬之綜觀尺度的 500hPa、850hPa 和地面的氣壓

場、風場、溫度場的特徵大致上與觀測的綜觀尺度分析場特徵類似；然而模式模擬探空資料和加密探空資料相比，東沙島探空的模擬顯示模式對於西南氣流上游 700 百帕以下的模擬風速較觀測風速弱約 30%。輔以台灣西南部陸地上的探空結果，發現西南氣流上游較弱的風場可能會導致模式中水氣輸送較少的現象，進而使得模擬的台灣西南部地面降水偏少。

利用 WRF 模式模擬的雷達回波與七股雷達觀測結果相對照，可大致區分出 IOP-4 期間通過台灣西南部陸地的兩波降水系統，其中模式對於第一波降水系統的掌握程度較佳。因此我們針對第一波系統進行細網域(5 公里水平網格間距)的地面累積降水與觀測資料之細部比較，以及最細網域(1.67 公里水平網格間距)的水平雷達回波、垂直雷達回波、雷達資料的降水粒子分類辨識結果與觀測資料的比對，其中以 NCAR/S-pol 雷達的觀測資料為主要的對照標的。WRF 模擬的地面累積降水分佈能合理掌握實際觀測降水分佈的多數特徵，但是模式累積降水量偏少，其中 MORI 和 THMN 實驗的降水分佈與觀測較接近。水平雷達回波的 WRF 模擬結果與 S-pol 雷達觀測資料對照之下，兩者呈現類似的降水系統演變過程。吾人進一步挑選降水系統登陸後，偏向對流結構和偏向層狀結構的兩個時間點，取模擬結果之兩個空間平均垂直剖面的雷達回波、水相粒子混合比結果，分別與 S-pol 雷達回波、

粒子分類資料互相比較。我們發現對流降水區的軟雹最低出現高度過低，層狀降水區的模擬雷達回波頂層普遍過高，亮帶特徵較不顯著，其中 MORI 實驗的水相粒子高度分佈特性與觀測最接近。以地面累積降水、雷達回波和降水粒子垂直分佈的模擬結果而論，MORI 實驗對此 IOP-4 降水系統的模擬與觀測資料的相似度最高。

六種雲微物理法皆以 LFO83 和 RH84 為最原始的發展雛形，而後逐漸根據新的理論或觀測分析結果修改而來，大多數雲物理法以調整冰相雲物理過程為主。MORI 方案是六種雲微物理法之中預報最多變數的雲微物理法，對於整個雲微物理過程有較全面性的考量。於混合比平均場的模擬結果中，MORI 方案較不會對於特定種類的水相粒子產生偏差，並且於對流降水區與層狀降水區的水相粒子混合比分佈特性有明顯的區別。THMN 方案最著重於雲冰、雪和毛毛雨的處理，依其設定則於本 IOP-4 個案中，傾向產生大量的雪。WSM5 方案、WSM6 方案和 WDM5 方案、WDM6 方案對冰相過程進行許多參數的調整，軟雹的計算對冰相雲物理特徵影響顯著，水相的雲物理特徵則與加入雲凝結核、雲水和雨水的粒子濃度計算有高度相關。

最後，如何改善台灣地區梅雨季的降水模擬，仍是一個相當具有挑戰性的問題。未來仍有許多工作必須完成，特別是西南氣流上游風速低估的現象，希望能藉由資料同化對其進行改善，進而調整西南氣流

之水氣傳送，再進一步分析其對於降水場是否會有明顯不同的結果。
還有對於雲微物理參數化方法中，未來希望能做源匯項的收支分析，
以便更明確區分出各種細部雲微物理作用對降水場的影響程度為何。

參考文獻

- 劉妍利, 2007: 梅雨降水系統的雙偏極化雷達資料分析與WRF模式模擬研究, 中央大學大氣物理研究所碩士論文。
- Cohard, J.-M., and J.-P. Pinty, 2000: A comprehensive two-moment warm microphysical bulk scheme. I: Description and tests. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1815-1842.
- Cooper, W. A., 1986: Ice initiation in natural clouds. *Precipitation Enhancement—A Scientific Challenge, Meteor. Monogr.*, No. 43, Amer. Meteor. Soc., 29–32.
- Cotton, W. R., G. J. Tripoli, R. M. Rauber, and E. A. Mulvihill, 1986; Numerical simulation of the effects of varying ice crystal nucleation rates and aggregation processes on orographic snowfall. *J. Appl. Meteorol.*, **25**, 1658-1680.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077–3107.
- Ferrier, B. S., 1994: A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 249-280.
- Field, P. R., R. J. Hogan, P. R. A. Brown, A. J. Illingworth, T. W. Chouarton, and R. J. Cotton, 2005: Parameterization of ice-particle size distributions for mid-latitude stratiform cloud. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1997–2017.
- Fletcher, N. H., 1962: The physics of rain clouds. Cambridge Univ. Press, 390pp.
- Grell, G.A. and D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geoph. Res. Lett.*, **29**, NO 14., 10.1029/2002GL015311.

- Gettelman A., H. Morrison, and S. J. Ghan, 2008: A New Two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the Community Atmosphere Model, Version 3 (CAM3). Part II: Single-column and global results. *J. Climate Appl. Meteor.*, **21**, 3660–3679.
- Heymsfield, A. J., and L. J. Donner, 1990: A scheme for parameterizing ice cloud water content in general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1865–1877.
- , and J. Iaquinata, 2000: Cirrus crystal terminal velocities. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 916–938.
- Hong, Song-You, Hua-Lu Pan, 1996: Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- , S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 103–120.
- , and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme. *Journal of the Korean Meteorological society*, **42**, 129–151.
- Houze, R. A., P. V. Hobbs, P. H. Herzegh, and D. B. Parsons, 1979: Size distributions of precipitation particles in frontal clouds. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 156–162.
- , 1997: Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox? *BAMS*, **78**, 2179-2196.
- Ikawa, M., and K. Saito, 1991: Description of a nonhydrostatic model developed at the forecast research department of the MRI. *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, No. 28.
- Kessler, E., III, 1969: On the distribution and continuity of water

substance in atmospheric circulations. *Meteor. Monogr.*, No. 32, Amer. Meteor. Soc., 84 pp.

Khain, A. P., N. BenMoshe, and A. Pokrovsky, 2008: Factors determining the impact of aerosols on surface precipitation from clouds: Attempt of classification. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 1721-1748.

Kong, F., and M. K. Yau, 1997: An explicit approach to microphysics in MC2. *Atmos.–Ocean*, **35**, 257–291.

Lim K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate Models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612.

Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1065–1092.

Marshall, J. S., and W. McK. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteor.*, **5**, 165–166.

Meyers, M. P., R. L. Walko, J. Y. Harrington, and W. R. Cotton, 1997: New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. *Atmos. Res.*, **45**, 3-39.

Mlawer, E. J., and S. A. Clough, 1997: On the extension of RRTM to the shortwave region. In Proceedings of the Sixth Atmospheric Measurement (ARM) Science Team Meeting, CONF-9603149, pp.223-226. U.S. Department of Energy, Washington, D.C.

Morrison, H., and J. O. Pinto, 2006: Intercomparison of bulk cloud microphysics schemes in mesoscale simulations of springtime Arctic mixed-phase stratiform clouds. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1880–1900.

———, and A. Gettelman, 2008: A new two-moment bulk stratiform

- cloud microphysics scheme in the Community Atmosphere Model, version 3 (CAM3). Part I: Description and numerical tests. *J. Climate*, **21**, 3642–3659.
- , M. D. Shupe, and J. A. Curry, 2003: Modeling clouds observed at SHEBA using a bulk parameterization implemented into a single-column model. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4255, doi:10.1029/2002JD002229.
- , J. A. Curry, and V. I. Khvorostyanov, 2005: A new doublemoment microphysics scheme for application in cloud and climate models. Part 1: Description. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1665–1677.
- , G. Thompson, V. Tatarskii, 2009: Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 991-1007.
- Murakami, M., 1990: Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 107-128.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosenfeld, 2001: Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, **294**, 2119-2124.
- Reisner, J., R. M. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1071–1107.
- Rutledge, S. A., and P. V. Hobbs, 1984: The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in mid-latitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2949–2972.

- Seifert, A., and K. D. Beheng, 2001: A double-moment parameterization for simulating autoconversion, accretion and selfcollection. *Atmos. Res.*, **59**, 265–281.
- Shi, J. J., W.-K. Tao, S. Lang, S. S. Chen, C. Peters-Lidard, and S.-Y. Hong, 2007: An improved bulk microphysical scheme for studying precipitation processes: Comparisons with other schemes. *Proc. 2007 AGU Joint Assembly*, Acapulco, Mexico. American Geophysical Union. [Proceeding is available at <http://www.agu.org>]
- Solomon, A., H. Morrison, O. Persson, M. D. Shupe, J.-W. Bao, 2009: Investigation of microphysical parameterizations of snow and ice in arctic clouds during M-PACE through model–observation comparisons. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3110-3128.
- Tao, W.-K., and J. S. Simpson, 1993: Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model description. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **4**, 35-72.
- Thompson, G., R. M. Rasmussen, and K. Manning, 2004: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 519–542.
- , R. M. Rasmussen, and K. Manning, 2008: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5095–5115.
- Tokay, A., and D. A. Short, 1996: Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 355-371.
- Tripoli, G. J., and W. R. Cotton, 1980: A numerical investigation of several factors contributing to the observed variable intensity of deep convection over south Florida. *J. Appl. Meteor.*, **19**,

1037–1063.

- Verlinde, J., P. J. Flatau, and W. R. Cotton, 1990: Analytical solutions to the collection growth equation: Comparison with approximate methods and application to the cloud microphysics parameterization schemes. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2871–2880.
- Walko, R. L., W. R. Cotton, M. P. Meyers, and J. Y. Harrington, 1995: New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme. *Atmos. Res.*, **38**, 29–62.
- Wang, C., and J. Chang, 1993: A three-dimensional numerical model of cloud dynamics, microphysics, and chemistry. Part I: Concepts and formulation. *J. Geophys. Res.*, **98**, 14827-14844.
- Wang, C., 2005: A modeling study of the response of tropical deep convection to the increase of cloud condensation nuclei concentration. Part I: Dynamics and microphysics, *J. Geophys. Res.*, **110**, D21211, doi:10.1029/2004JD005720.
- Wisner, C., H. D. Orville, and C. Myers, 1972: A numerical model of a hail-bearing cloud. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1160-1181.
- Ziegler, C. L., 1985: Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part1: Model development and preliminary testing. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1487-1509.

網路資料：SoWMEX/TiMREX Field Catalog。取自

<http://sowmex.cwb.gov.tw/2008/>

附錄

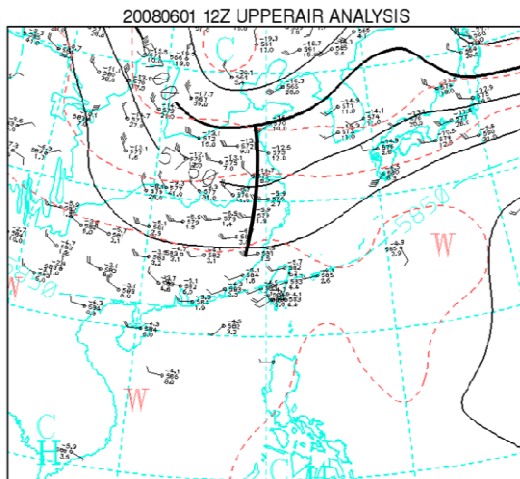
本附錄為 4-3 小節中，各公式內之符號說明。

符號	說明
D	降水粒子的粒徑大小
M_i	冰晶的質量，為冰晶粒徑的函數
N_x	各類水相粒子的粒子濃度
N_{i0}	冰核初始粒子濃度
$N_{0,x}$	各類水相粒子的粒徑譜截距
V_i	冰晶的終端落速
q_x	降水粒子之混合比
Λ_0	雪的粒徑分佈常數
Λ_1	雪的粒徑分佈常數
κ_0	雪的粒徑分佈常數
κ_1	雪的粒徑分佈常數
μ_x	降水粒子的 Gamma 函數粒徑分佈之譜型參數
ρ	降水粒子之密度

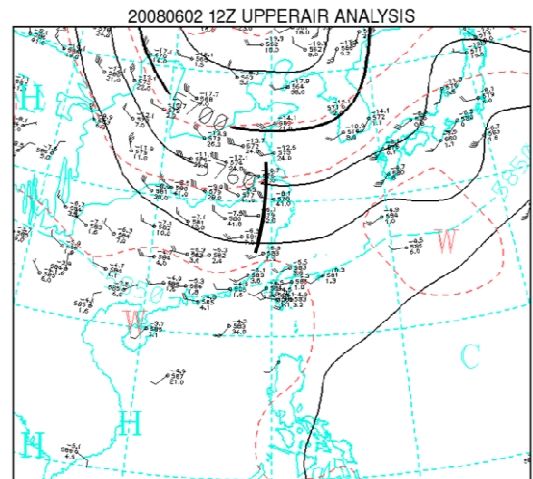
	6/1		6/2				6/3				6/4	AVG
	1200	1800	0000	0600	1200	1800	0000	0600	1200	1800	0000	
O	20.00	16.67	21.67	24.00	25.71	22.50	32.14	-	20.71	13.86	20.71	21.80
S	14.00	22.00	16.00	12.50	13.00	17.00	22.50	15.50	11.50	11.00	18.00	15.73
S/O	0.70	1.32	0.74	0.52	0.51	0.76	0.70	-	0.56	0.79	0.87	0.72

表 1 東沙島探空 700 百帕以下的平均風速資料，單位是 kts。最上兩行紫色字體標示日期及時間(UTC)，最左列的 O 表示觀測的平均風速、S 表示模擬的平均風速，均為該觀測時間的 700 百帕以下風速平均值。S/O 表示模擬的風速除以觀測的風速之比值。

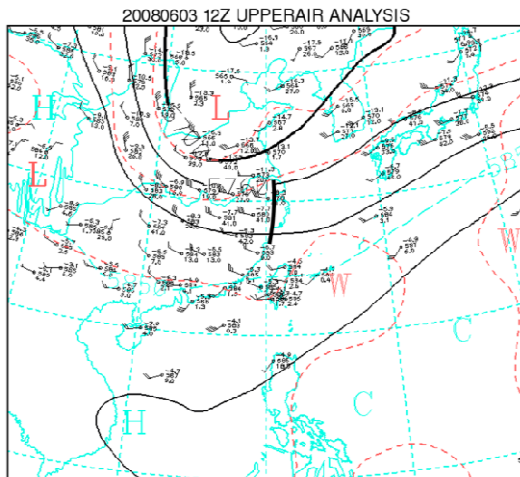
(a)2008/6/1 1200UTC



(b)2008/6/2 1200UTC



(c)2008/6/3 1200UTC



(d)2008/6/4 0000UTC

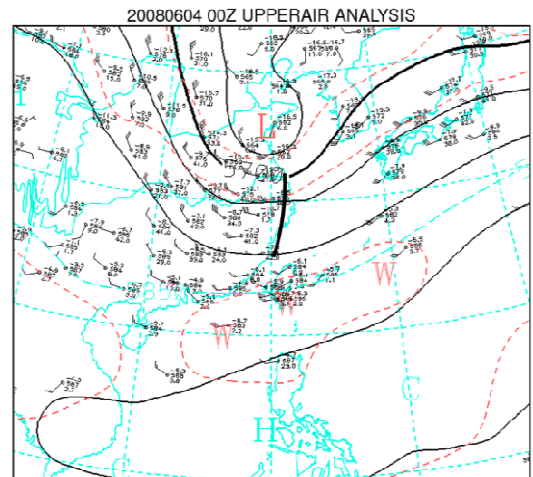
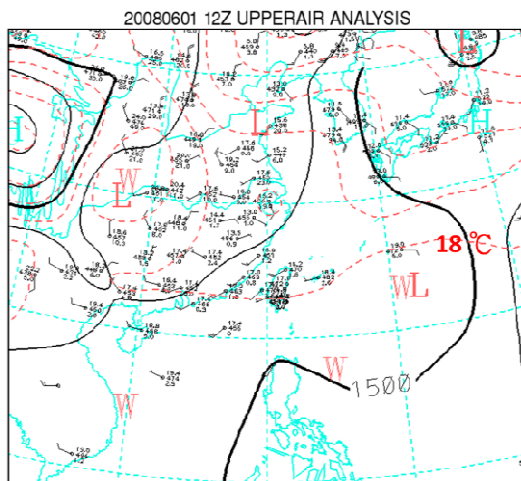
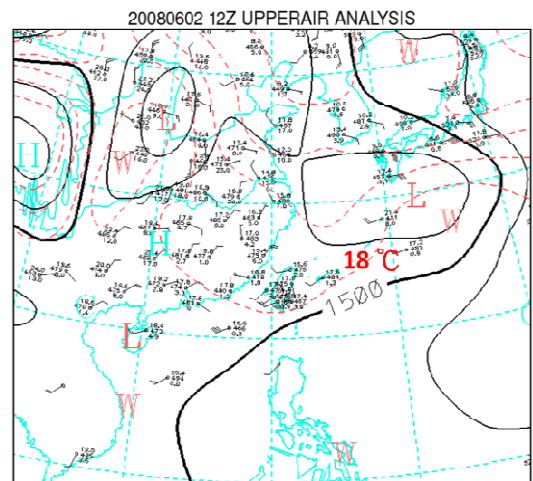


圖 3.1 (a) 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 500hPa 天氣圖；(b) 2008 年 6 月 2 日 1200UTC；(c) 2008 年 6 月 3 日 1200UTC；及(d) 2008 年 6 月 4 日 0000UTC。黑色實線為等高線，黑色粗實線是槽線位置，紅色虛線為等溫線。

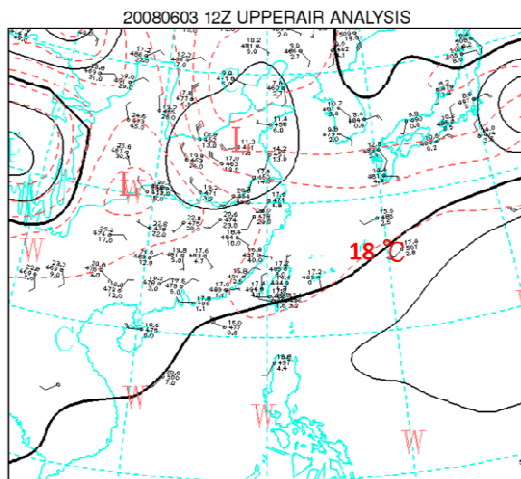
(a)2008/6/1 1200UTC



(b)2008/6/2 1200UTC



(c)2008/6/3 1200UTC



(d)2008/6/4 0000UTC

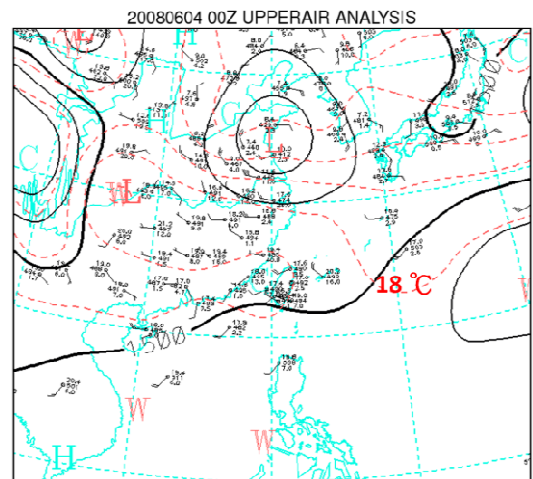
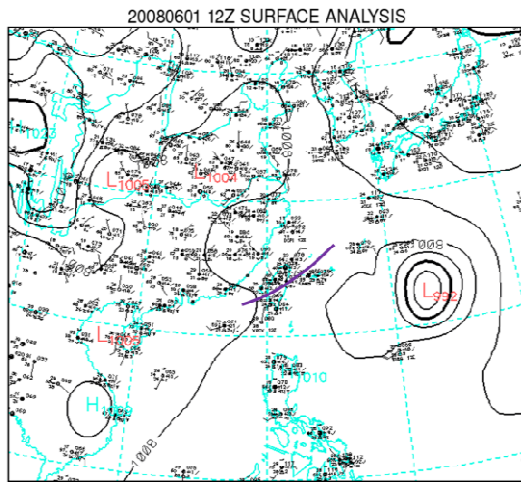
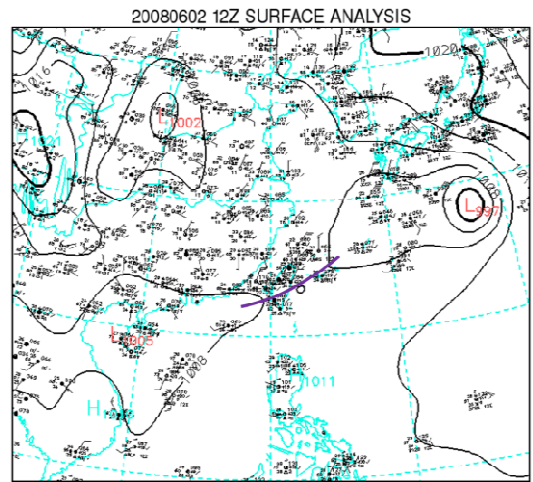


圖 3.2 (a) 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 850hPa 天氣圖；(b) 2008 年 6 月 2 日 1200UTC；(c) 2008 年 6 月 3 日 1200UTC；及(d) 2008 年 6 月 4 日 0000UTC。黑色實線為等高線，黑色粗實線為 1500 公尺等高線，紅色虛線為等溫線。

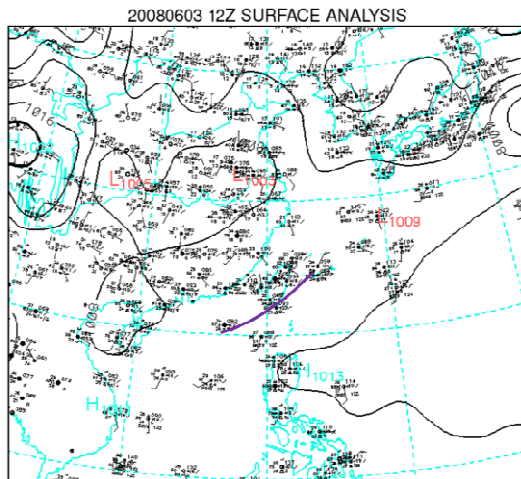
(a)2008/6/1 1200UTC



(b)2008/6/2 1200UTC



(c)2008/6/3 1200UTC



(d)2008/6/4 0000UTC

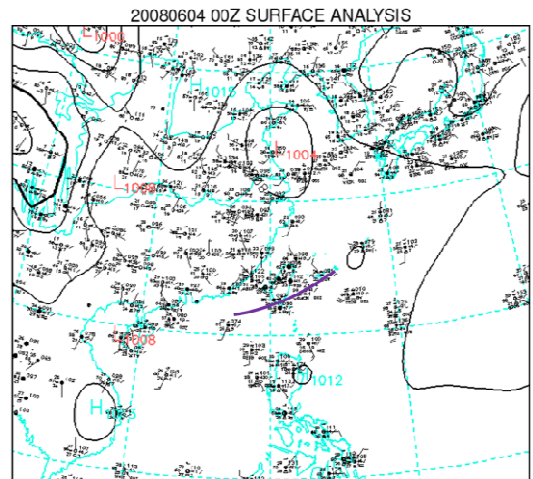
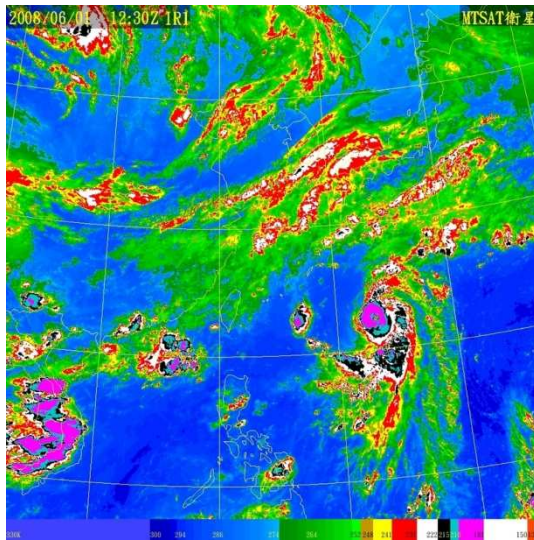
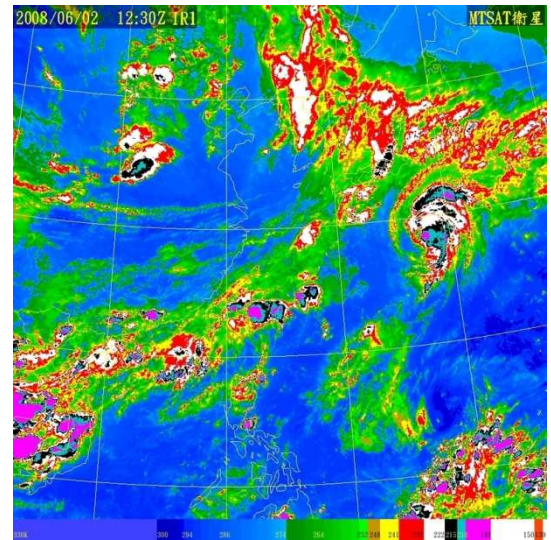


圖 3.3 (a) 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 地面天氣圖；(b) 2008 年 6 月 2 日 1200UTC；(c) 2008 年 6 月 3 日 1200UTC；(d) 2008 年 6 月 4 日 0000UTC。黑色實線為等高線，黑色粗實線為 1500 公尺等高線，紅色虛線為等溫線，紫線是由地面風切線所決定之台灣臨近地區地面鋒面位置。

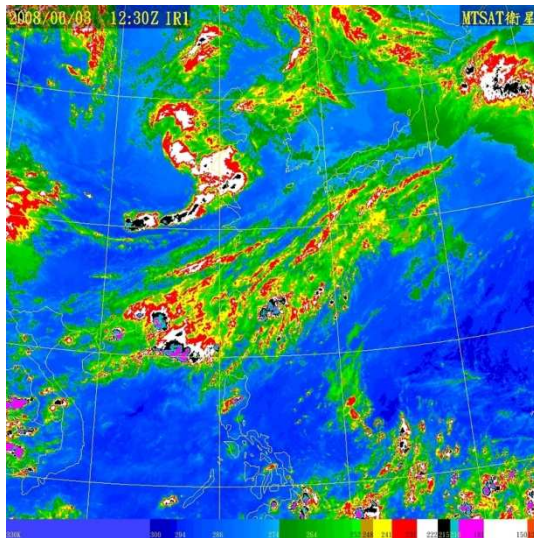
(a)2008/6/1 1230UTC



(b)2008/6/2 1230UTC



(c)2008/6/3 1230UTC



(d)2008/6/4 0030UTC

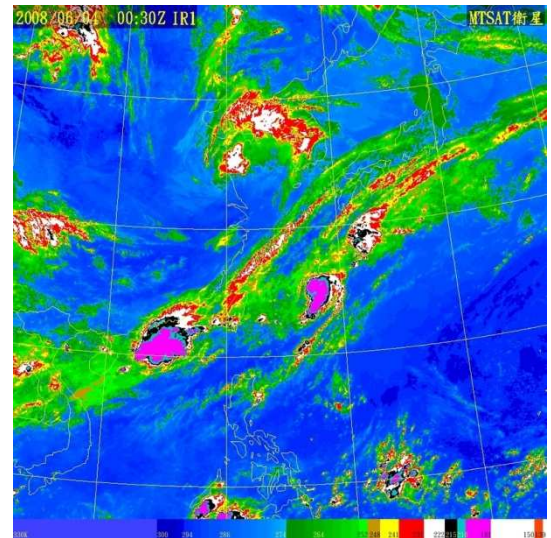
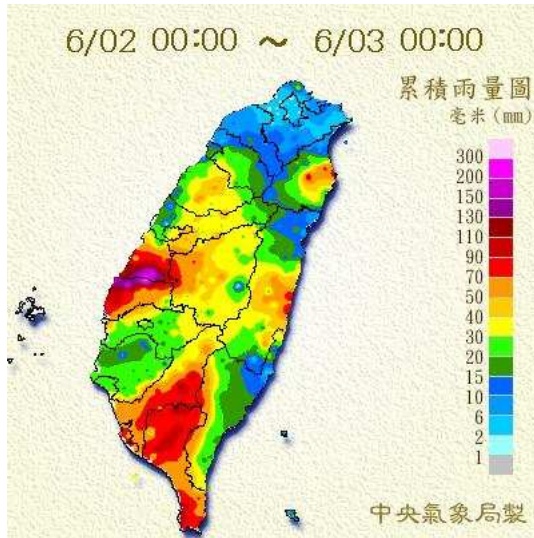


圖 3.4 (a) 2008 年 6 月 1 日 1230UTC 紅外線色調強化衛星雲圖；(b) 2008 年 6 月 2 日 1230UTC；(c) 2008 年 6 月 3 日 1230UTC；(d) 2008 年 6 月 4 日 0030UTC。

(a)2008/6/2 0000LST~2008/6/3 0000LST



(b)2008/6/3 0000LST~2008/6/4 0000LST

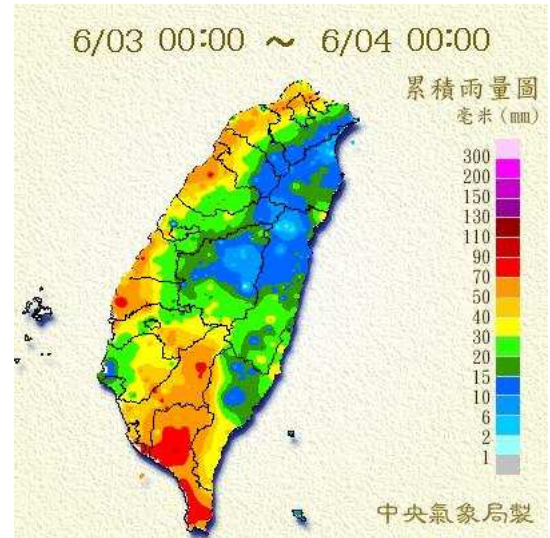
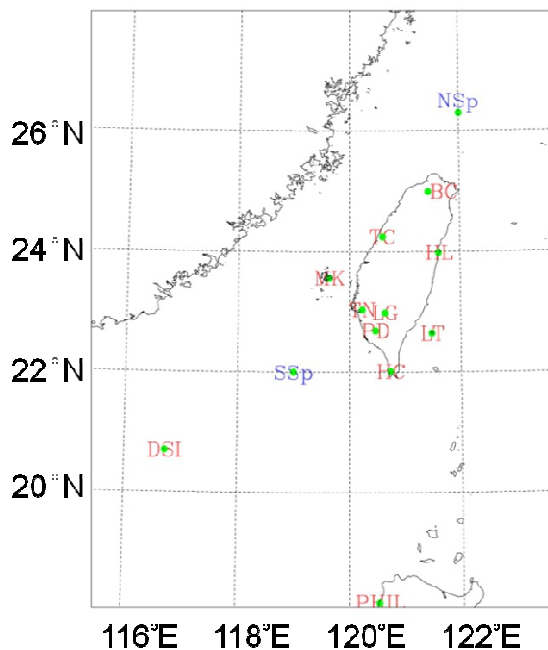


圖 3.5 : (a)2008 年 6 月 2 日 0000LST~2008 年 6 月 3 日 0000LST 24 小時地面累積雨量圖；(b)2008 年 6 月 3 日 0000LST~2008 年 6 月 4 日 0000LST 24 小時地面累積雨量圖。

(a)

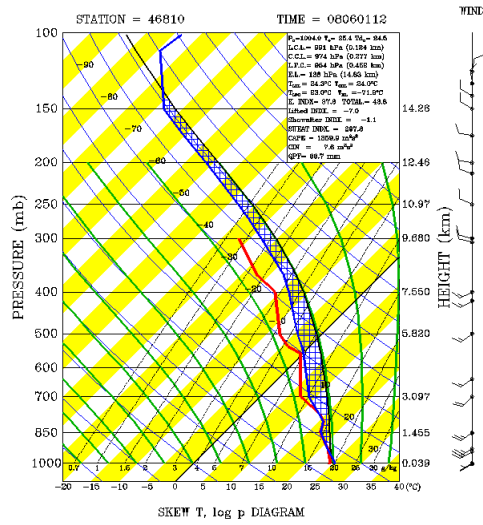


(b)

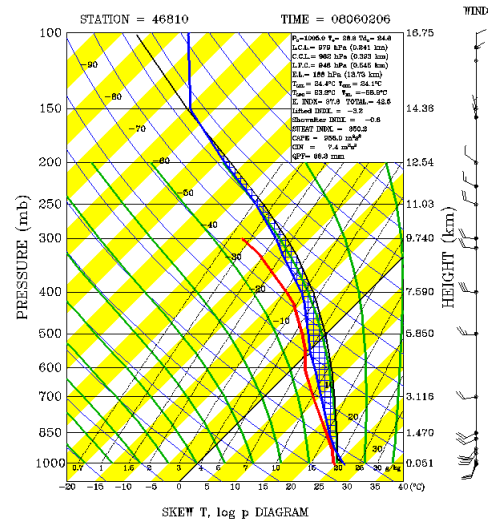


圖 3.6 (a)SoWMEX 實驗探空氣球施放點，陸上觀測站有 BC(板橋站)、TC(台中站)、HL(花蓮站)、MK(馬公站)、TN(台南永康站)、LG(六龜站)、LT(綠島)、HC(恆春站)、DSI(東沙島)、PHIL(菲律賓)，海上觀測站有 NSp(北船)、SSp(南船)，北船和南船標示點為估計位置；(b)台灣地形圖 (<http://gis.geo.ncu.edu.tw/earth/shade/twshade.htm>)。

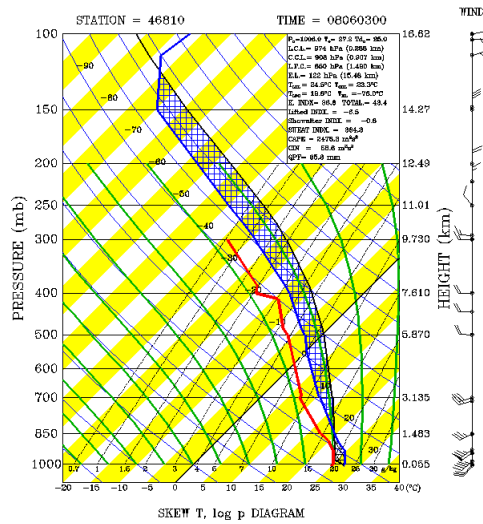
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

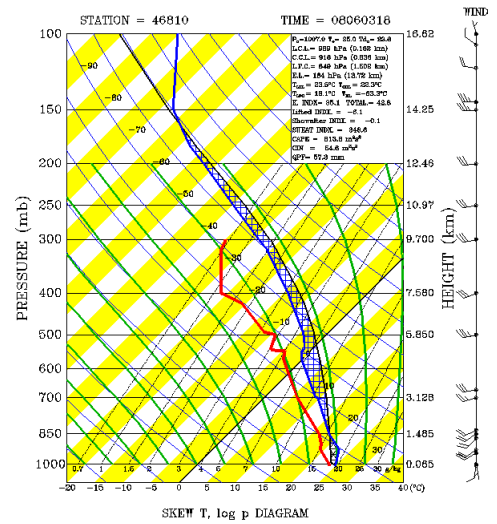
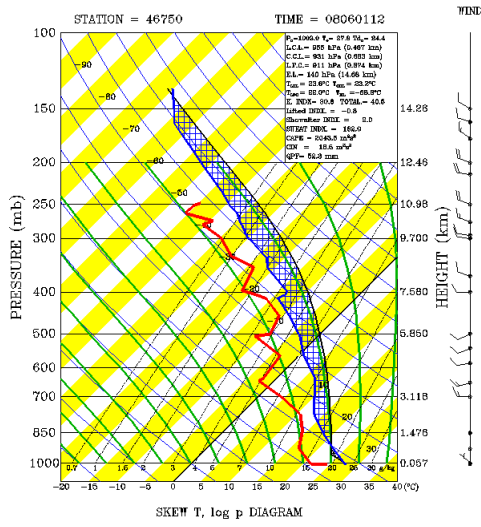
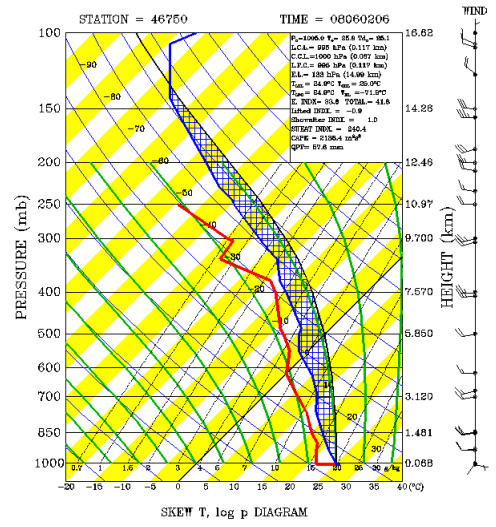


圖 3.7 東沙島探空圖，依照時間排序分別為：(a)2008 年 6 月 1 日 1200UTC、(b)2008 年 6 月 2 日 0600UTC、(c)2008 年 6 月 3 日 0000UTC、(d)2008 年 6 月 3 日 1800UTC。

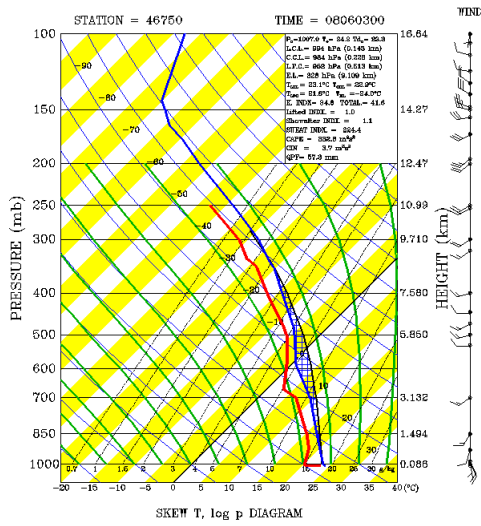
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

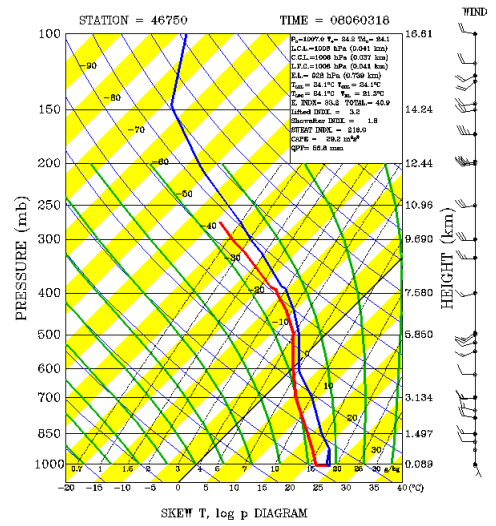
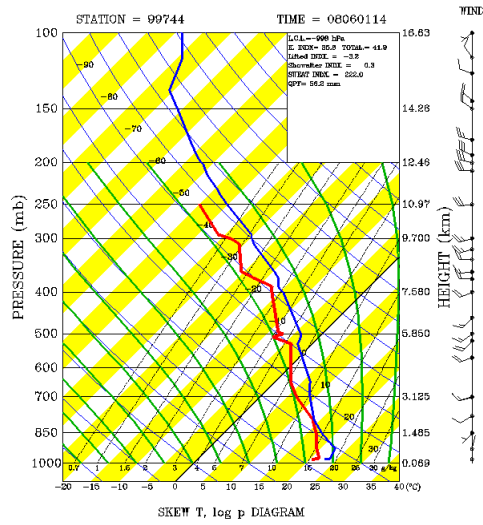
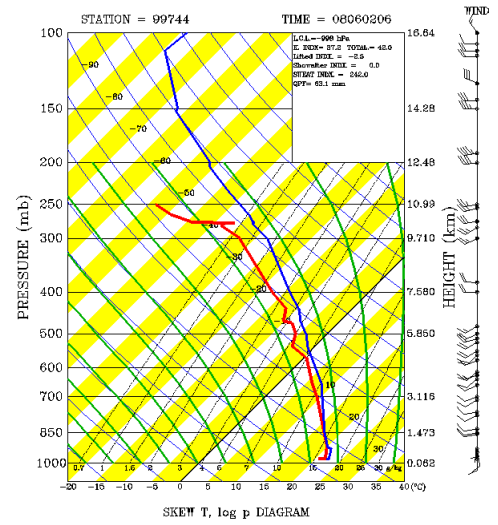


圖 3.8 屏東站探空圖，(a) (b) (c) (d)的說明如圖 3.7。

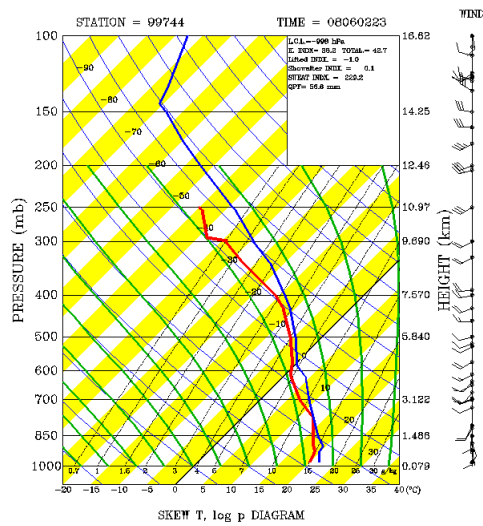
(a) 2008/6/1 1400UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/2 2300UTC



(d) 2008/6/3 1700UTC

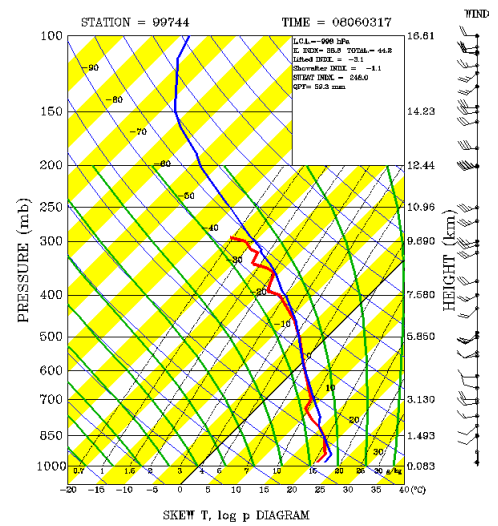
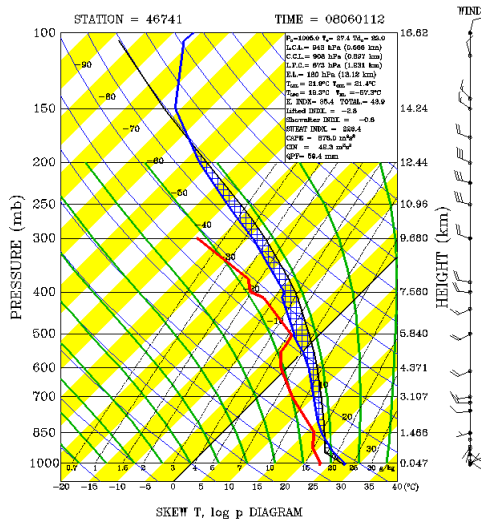
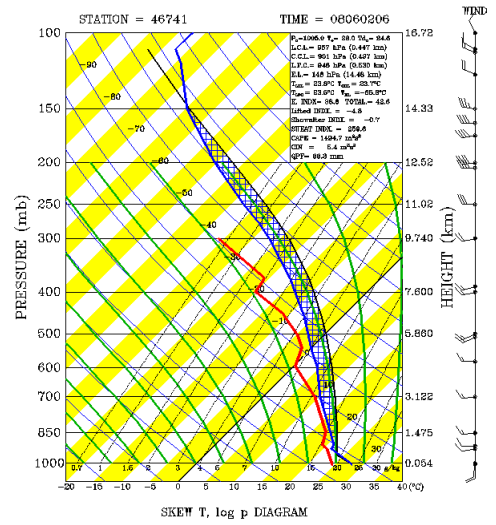


圖 3.10 六龜站探空圖，(b)的說明如圖 3.7。(a) 的時間點為 2008 年 6 月 1 日 1400UTC、(c)時間點為 2008 年 6 月 2 日 2300UTC、(d)時間點為 2008 年 6 月 3 日 1700UTC，可能是觀測時遇到某些技術上的問題，故這三筆資料與其他探空測站的觀測時間稍有不同，使用資料時需要考慮時間差異的因素。

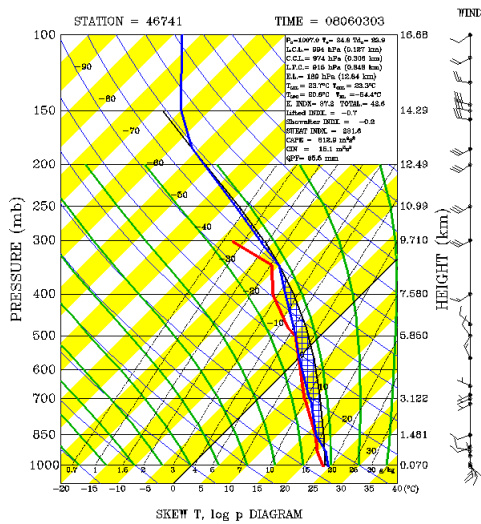
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0300UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

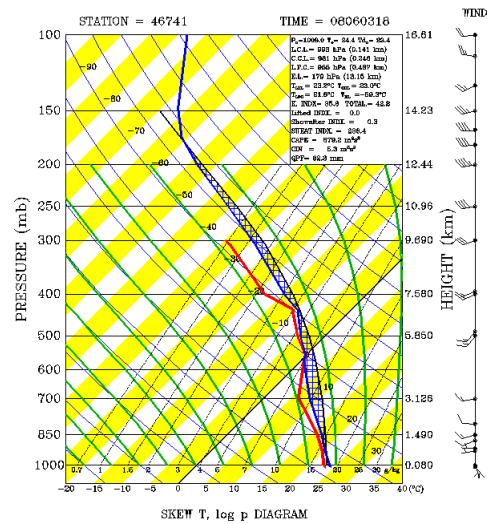
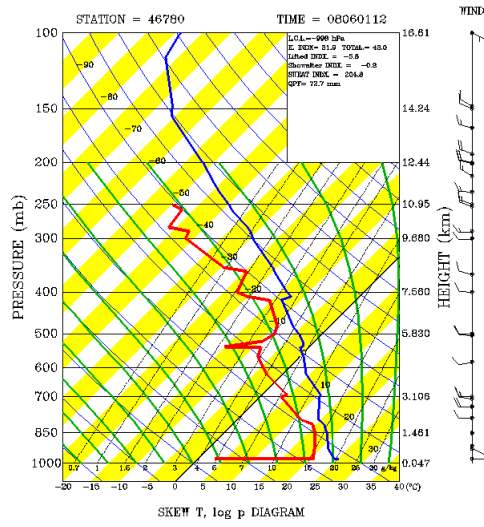
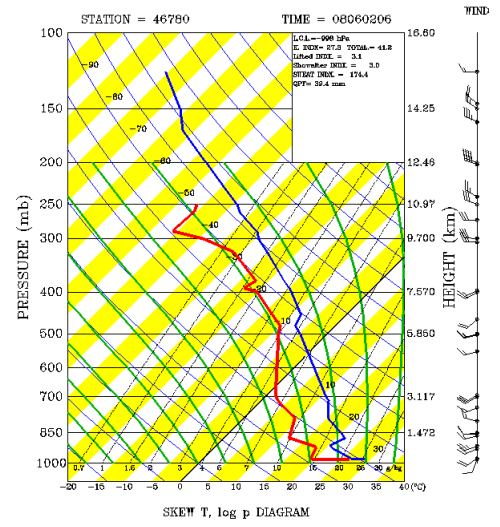


圖 3.11 台南永康站探空圖，(a) (b) (d)的說明如圖 3.7，(c)時間點為 2008 年 6 月 3 日 0300UTC，因為該站 2008 年 6 月 3 日 0000UTC 探空可能有問題，不利於判讀，故改放後一個時間點的觀測資料。

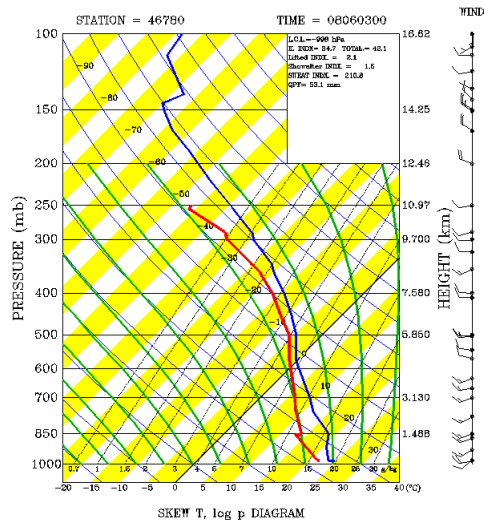
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

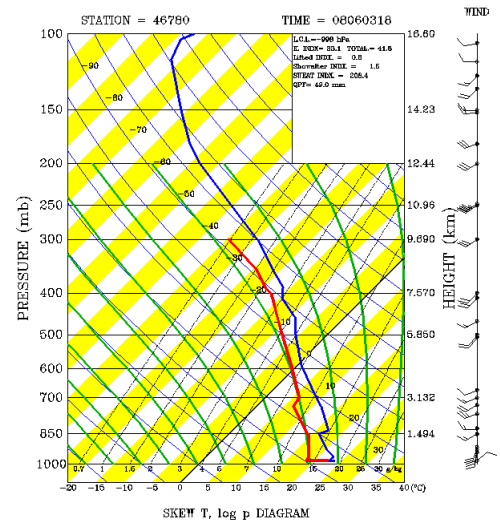


圖 3.12 綠島站探空圖，(a) (b) (c) (d)的說明如圖 3.7。

WRF ARW Modeling System Flow Chart (for WRFV2)

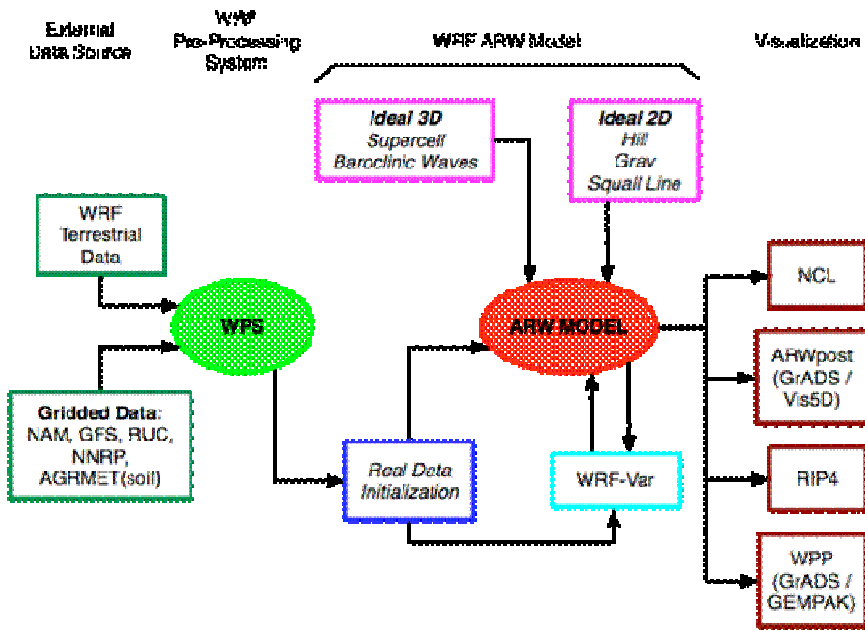


圖 4.1 為 WRF 模式的基本架構。

(取自 http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/users_guide_chap1.html)

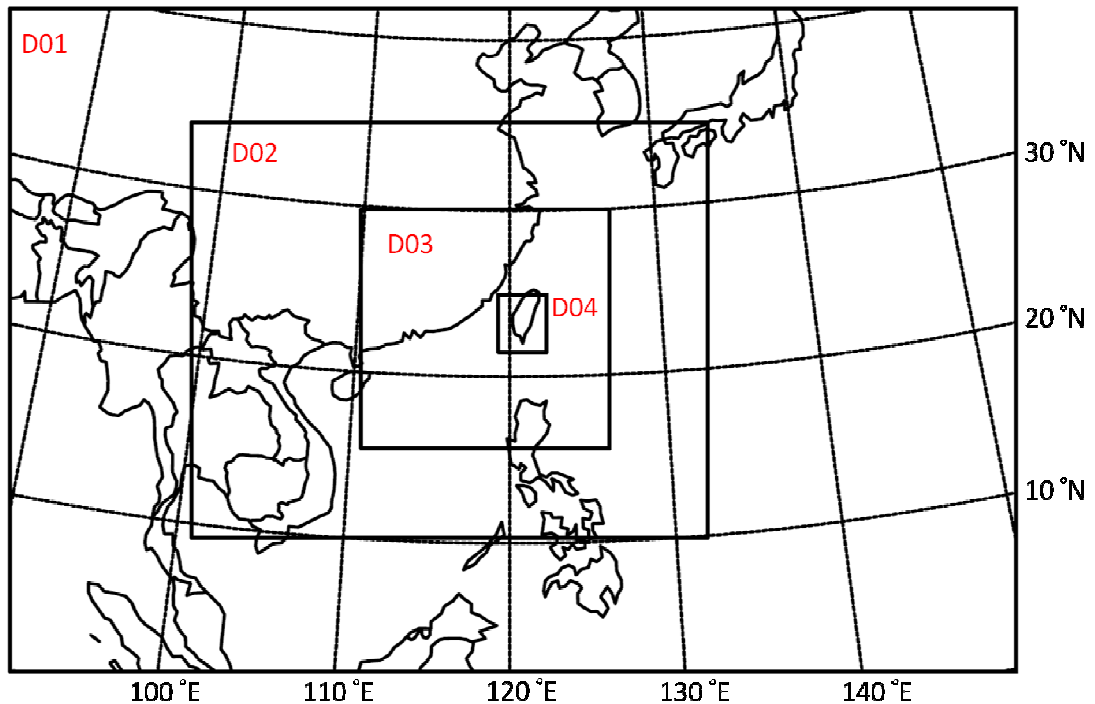
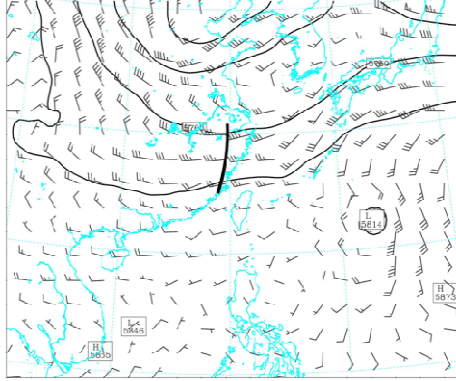


圖 4.2 本論文研究所使用之 WRF 模式網域設定，左側為水平網域範圍，右側為垂直分層示意圖。水平網域共設四層巢狀網格，第一層網域(D01)的水平網格間距為 45 公里，第二層網域(D02)的水平網格間距為 15 公里，第三層網域(D03)的水平網格間距為 5 公里，第四層網域(D04)的水平網格間距為 1.67 公里。垂直分層共 32 層，模式頂層氣壓設為 10 百帕。

(a) 2008/6/1 1200UTC

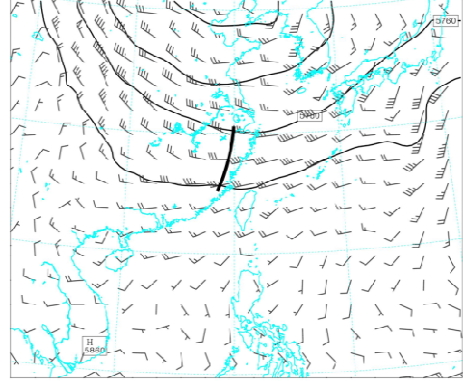
Dataset: d1 R/P: p500 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fct: 0:00 h Valid: 1200 UTC Sun 01 Jun 08 (2000 LST Sun 01 Jun 08)
Geopotential height at pressure = 500 hPa sm= 3
Horizontal wind vectors at pressure = 500 hPa



Model In'o: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km, 31 levels, 160 sec
LV: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(b) 2008/6/2 1200UTC

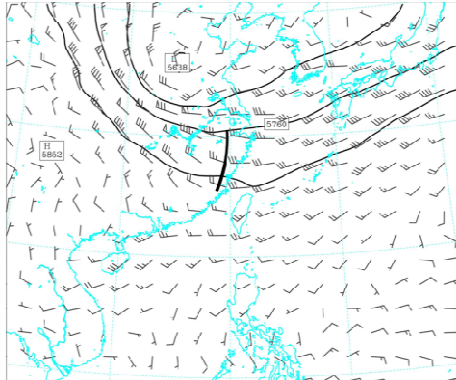
Dataset: d1 R/P: p500 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fct: 24:00 h Valid: 1200 UTC Mon 02 Jun 08 (2000 LST Mon 02 Jun 08)
Geopotential height at pressure = 500 hPa sm= 3
Horizontal wind vectors at pressure = 500 hPa



Model In'o: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km, 31 levels, 160 sec
LV: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(c) 2008/6/3 1200UTC

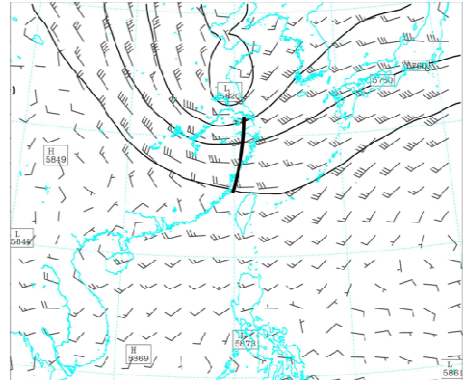
Dataset: d1 R/P: p500 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fct: 48:00 h Valid: 1200 UTC Tue 03 Jun 08 (2000 LST Tue 03 Jun 08)
Geopotential height at pressure = 500 hPa sm= 3
Horizontal wind vectors at pressure = 500 hPa



Model In'o: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km, 31 levels, 160 sec
LV: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(d) 2008/6/4 0000UTC

Dataset: d1 R/P: p500 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fct: 00:00 h Valid: 0000 UTC Wed 04 Jun 08 (0300 LST Wed 04 Jun 08)
Geopotential height at pressure = 500 hPa sm= 3
Horizontal wind vectors at pressure = 500 hPa

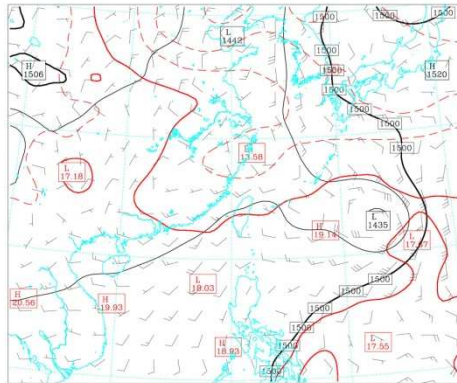


Model In'o: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km, 31 levels, 160 sec
LV: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

圖 5.1 WRF 模式模擬結果的綜觀尺度預報場，為第一層網域的 500hPa 高度場及風場。黑色等值線為高度場，等值線間距為 60m；風標一長槓為 5m/s，粗黑色實線為槽線位置。(a)圖是 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 的預報場；(b)圖是 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 的預報場，(c)圖是 2008 年 6 月 3 日 1200UTC 的預報場，(d)圖是 2008 年 6 月 4 日 0000UTC 的預報場。

(a) 2008/6/1 1200UTC

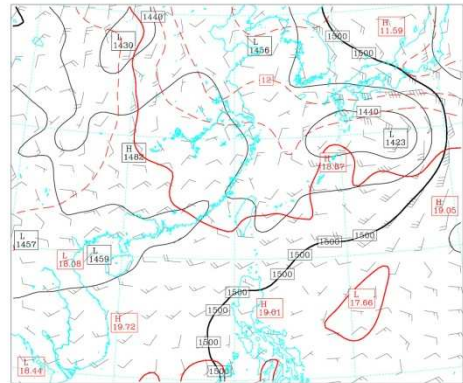
Dataset: d1 RIP: p850 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
 Fcst: 0.00 h Valid: 1200 UTC Sun 01 Jun 08 (2000 LST Sun 01 Jun 08)
 Geopotential height at pressure = 850 hPa sm = 8
 Geopotential height at pressure = 850 hPa sm = 8
 Temperature at pressure = 850 hPa sm = 8
 Temperature at pressure = 850 hPa sm = 8
 Horizontal wind vectors at pressure = 850 hPa



BARB VECTORS: FULL BARB = 5 m s⁻¹
 CONTOURS: UNITS-C LOW= 18.000 HIGH= 18.000 INTERVAL= 0.50000E-11
 CONTOURS: UNITS-C LOW= 21.000 HIGH= 21.000 INTERVAL= 3.0000
 CONTOURS: UNITS-m LOW= 1500.0 HIGH= 1500.0 INTERVAL= 0.50000E-11
 CONTOURS: UNITS-m LOW= 1440.0 HIGH= 1500.0 INTERVAL= 30.000
 Model Info: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km, 31 levels, 180 sec
 LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(b) 2008/6/2 1200UTC

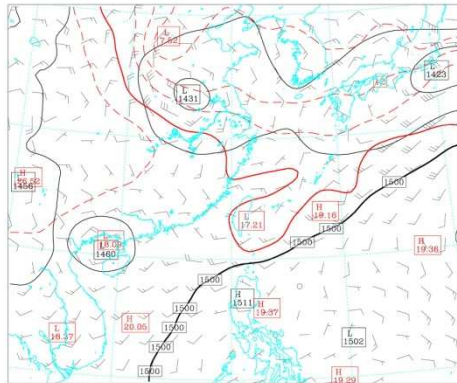
Dataset: d1 RIP: p850 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
 Fcst: 24.00 h Valid: 1200 UTC Mon 02 Jun 08 (2000 LST Mon 02 Jun 08)
 Geopotential height at pressure = 850 hPa sm = 8
 Geopotential height at pressure = 850 hPa sm = 8
 Temperature at pressure = 850 hPa sm = 8
 Temperature at pressure = 850 hPa sm = 8
 Horizontal wind vectors at pressure = 850 hPa



BARB VECTORS: FULL BARB = 5 m s⁻¹
 CONTOURS: UNITS-C LOW= 18.000 HIGH= 18.000 INTERVAL= 0.50000E-11
 CONTOURS: UNITS-C LOW= 21.000 HIGH= 21.000 INTERVAL= 3.0000
 CONTOURS: UNITS-m LOW= 1500.0 HIGH= 1500.0 INTERVAL= 0.50000E-11
 CONTOURS: UNITS-m LOW= 1440.0 HIGH= 1500.0 INTERVAL= 30.000
 Model Info: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km, 31 levels, 180 sec
 LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(c) 2008/6/3 1200UTC

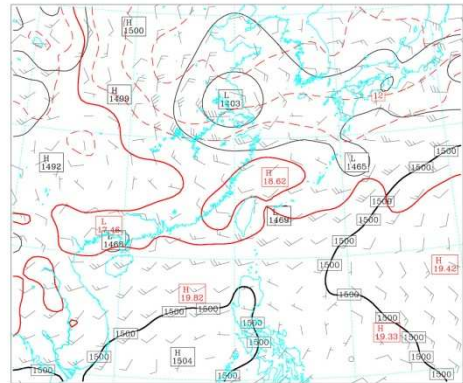
Dataset: d1 RIP: p850 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
 Fcst: 48.00 h Valid: 1200 UTC Tue 03 Jun 08 (2000 LST Tue 03 Jun 08)
 Geopotential height at pressure = 850 hPa sm = 8
 Geopotential height at pressure = 850 hPa sm = 8
 Temperature at pressure = 850 hPa sm = 8
 Temperature at pressure = 850 hPa sm = 8
 Horizontal wind vectors at pressure = 850 hPa



BARB VECTORS: FULL BARB = 5 m s⁻¹
 CONTOURS: UNITS-C LOW= 18.000 HIGH= 18.000 INTERVAL= 0.50000E-11
 CONTOURS: UNITS-C LOW= 21.000 HIGH= 21.000 INTERVAL= 3.0000
 CONTOURS: UNITS-m LOW= 1500.0 HIGH= 1500.0 INTERVAL= 0.50000E-11
 CONTOURS: UNITS-m LOW= 1440.0 HIGH= 1500.0 INTERVAL= 30.000
 Model Info: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km, 31 levels, 180 sec
 LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(d) 2008/6/4 0000UTC

Dataset: d1 RIP: p850 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
 Fcst: 60.00 h Valid: 0000 UTC Wed 04 Jun 08 (0800 LST Wed 04 Jun 08)
 Geopotential height at pressure = 850 hPa sm = 8
 Geopotential height at pressure = 850 hPa sm = 8
 Temperature at pressure = 850 hPa sm = 8
 Temperature at pressure = 850 hPa sm = 8
 Horizontal wind vectors at pressure = 850 hPa

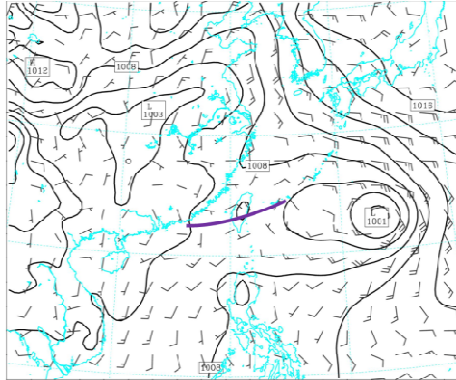


BARB VECTORS: FULL BARB = 5 m s⁻¹
 CONTOURS: UNITS-C LOW= 18.000 HIGH= 18.000 INTERVAL= 0.50000E-11
 CONTOURS: UNITS-C LOW= 21.000 HIGH= 21.000 INTERVAL= 3.0000
 CONTOURS: UNITS-m LOW= 1500.0 HIGH= 1500.0 INTERVAL= 0.50000E-11
 CONTOURS: UNITS-m LOW= 1440.0 HIGH= 1500.0 INTERVAL= 30.000
 Model Info: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km, 31 levels, 180 sec
 LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

圖 5.2 WRF 模式模擬結果的綜觀尺度預報場，為第一層網域的 850hPa 高度場、溫度場及風場。黑色等值線為高度場，等值線間距為 30m；粗黑線是 1500m 等值線；紅色虛線為等溫線，等值線間距為 3°C；紅色實線是 18°C 等溫線；風標一長槓為 5m/s。(a)(b)(c)(d)的預報場時間點同圖 5.1。

(a) 2008/6/1 1200UTC

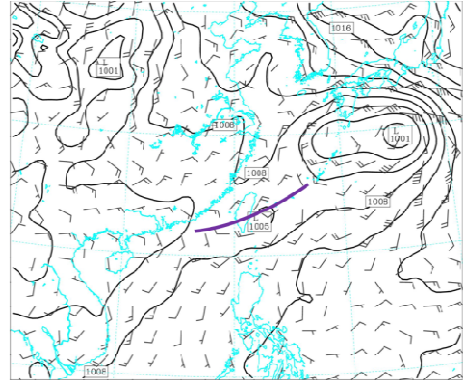
Dataset: d1 RIP: sfc Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 00.00 h Valid: 1200 UTC Sun 01 Jun 08 (2000 LST Sun 01 Jun 08) sm= 3
Sea-level pressure
Horizontal wind vectors at k-index = 31



CONTOURS: UNITS=hPa LOW= 1000.0 HIGH= 1020.0 INTERVAL= 2.0000
Model info: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km. 31 levels. 160 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(b) 2008/6/2 1200UTC

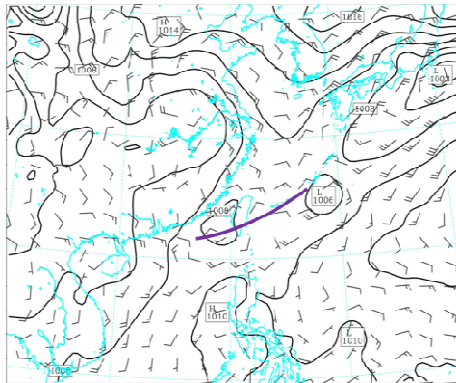
Dataset: d1 RIP: sfc Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 24.00 h Valid: 1200 UTC Mon 02 Jun 08 (2000 LST Mon 02 Jun 08) sm= 3
Sea-level pressure
Horizontal wind vectors at k-index = 31



CONTOURS: UNITS=hPa LOW= 1000.0 HIGH= 1020.0 INTERVAL= 2.0000
Model info: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km. 31 levels. 160 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(c) 2008/6/3 1200UTC

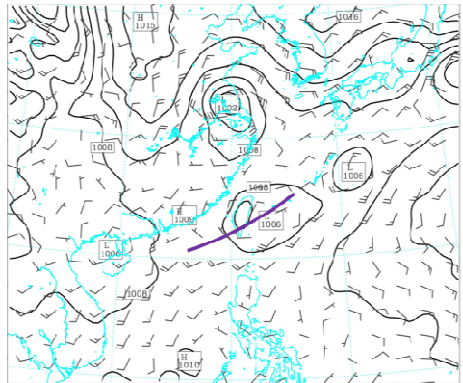
Dataset: d1 RIP: sfc Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 40.00 h Valid: 1200 UTC Tue 03 Jun 08 (2000 LST Tue 03 Jun 08) sm= 3
Sea-level pressure
Horizontal wind vectors at k index = 31



CONTOURS: UNITS=hPa LOW= 1000.0 HIGH= 1020.0 INTERVAL= 2.0000
Model info: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km. 31 levels. 160 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(d) 2008/6/4 0000UTC

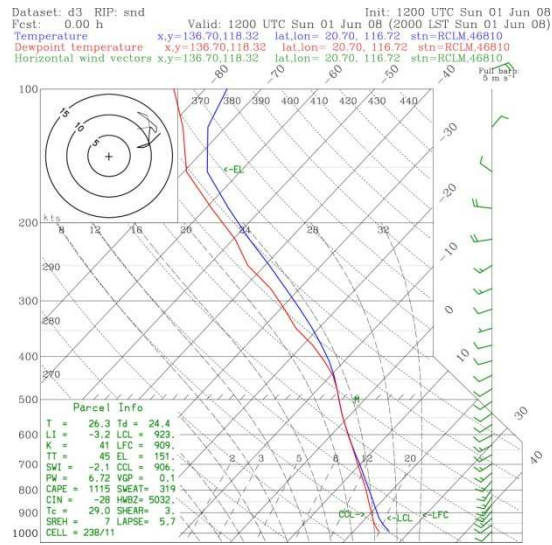
Dataset: d1 RIP: sfc Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 00.00 h Valid: 0000 UTC Wed 04 Jun 08 (0000 LST Wed 04 Jun 08) sm= 3
Sea-level pressure
Horizontal wind vectors at k index = 31



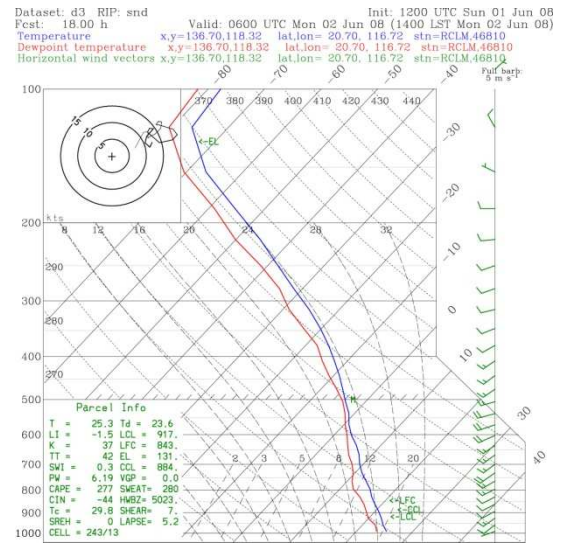
CONTOURS: UNITS=hPa LOW= 1000.0 HIGH= 1020.0 INTERVAL= 2.0000
Model info: V3.1 G-D Ens YSU PBL Ther-Diff 45 km. 31 levels. 160 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

圖 5.3 WRF 模式模擬結果的綜觀尺度預報場，為第一層網域的海平面氣壓場及風場。黑色等值線為氣壓場，等值線間距為 2 百帕；風標一長槓為 5m/s。(a)(b)(c)(d) 的預報場時間點同圖 5.1。

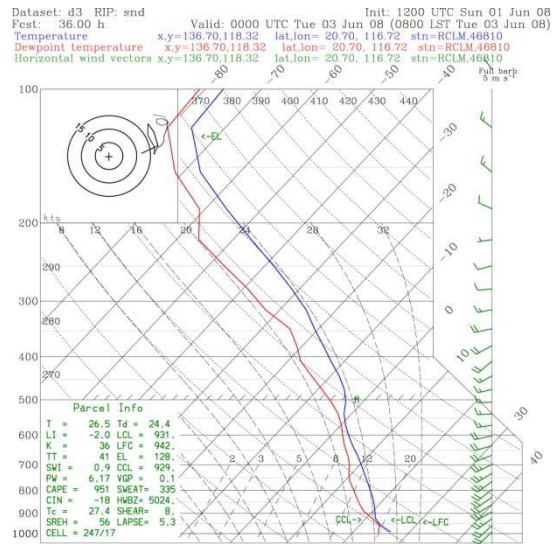
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

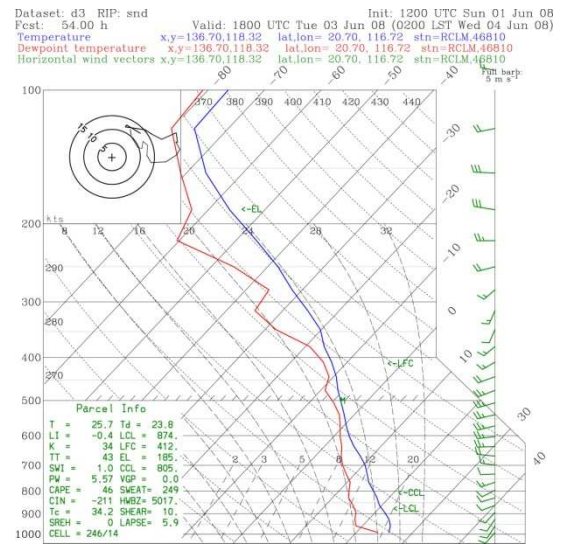
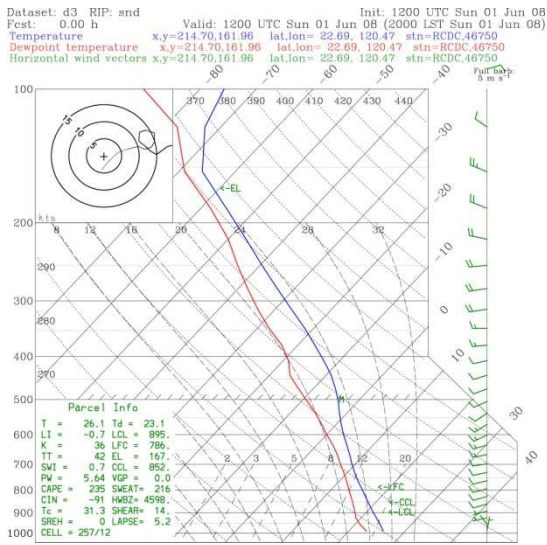
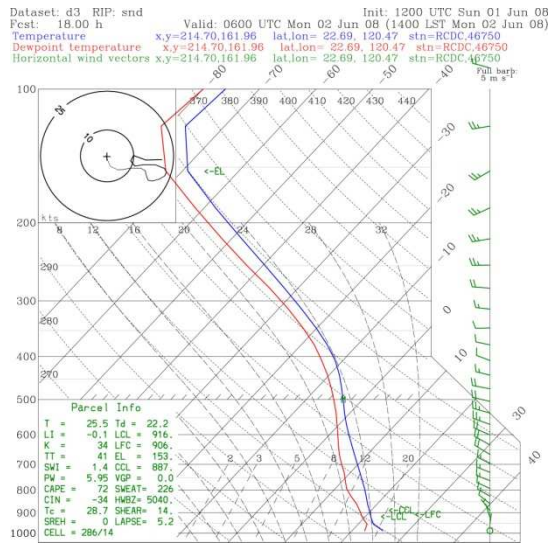


圖 5.4 東沙島模式探空圖。藍色實線為溫度線，紅色實線為露點溫度線，風標一長槓為 5m/s。(a)圖預報場時間點為 2008 年 6 月 1 日 1200UTC；(b)圖預報場時間點為 2008 年 6 月 2 日 0600UTC；(c)圖預報場時間點為 2008 年 6 月 3 日 0000UTC；(d)圖預報場時間點為 2008 年 6 月 3 日 1800UTC。

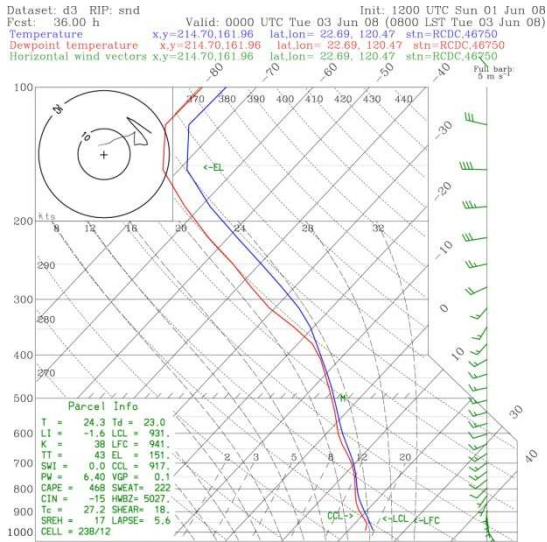
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

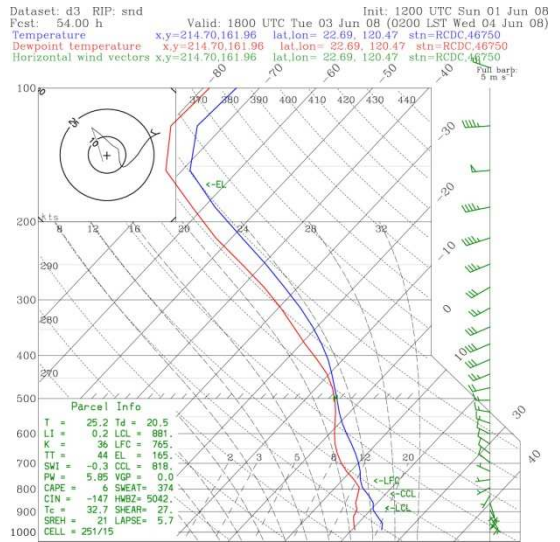
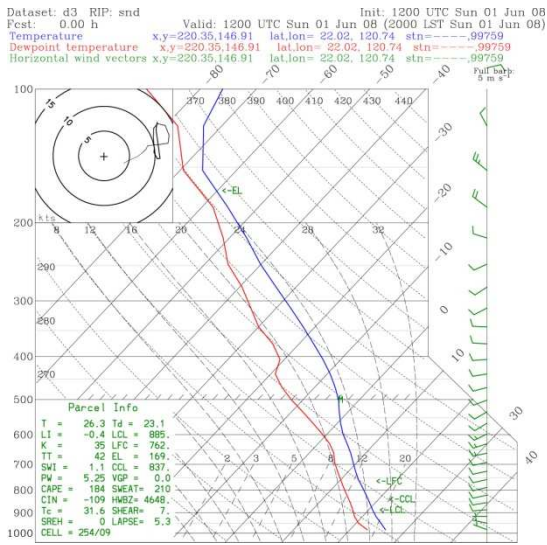
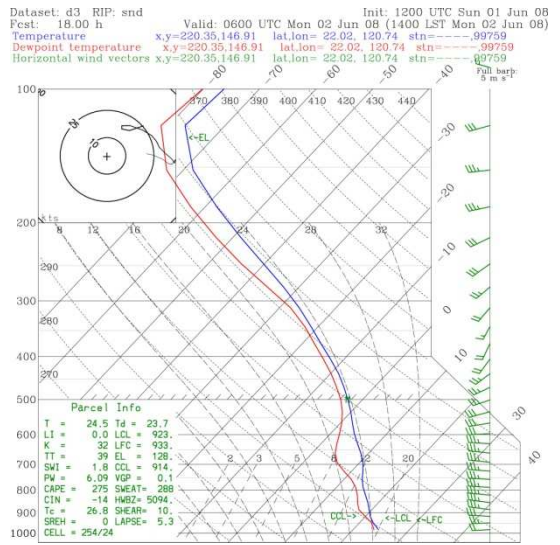


圖 5.5 屏東站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。

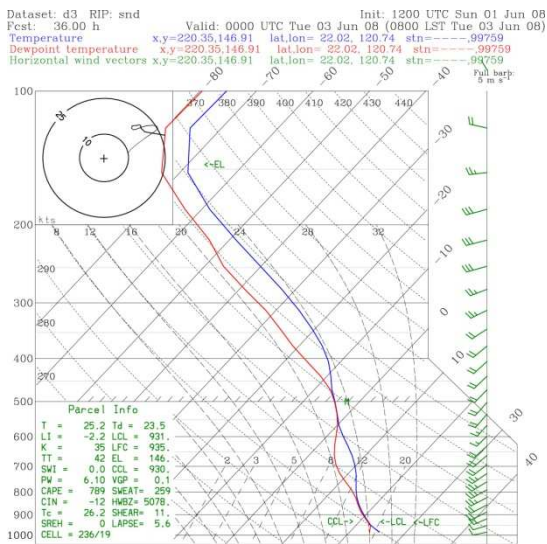
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

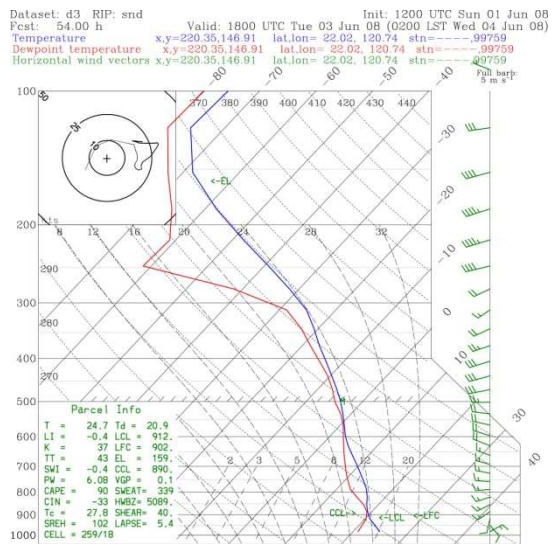
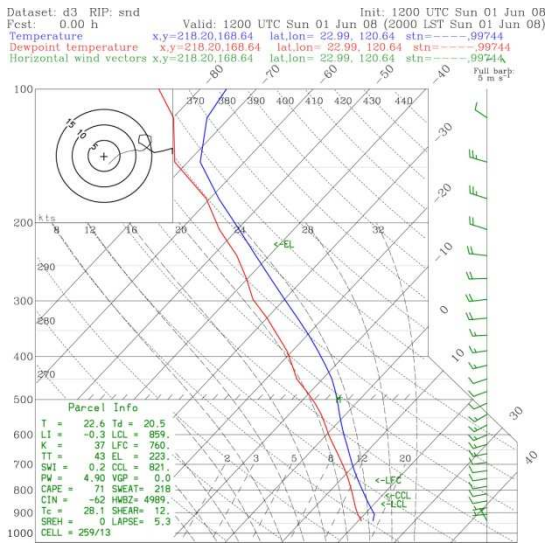
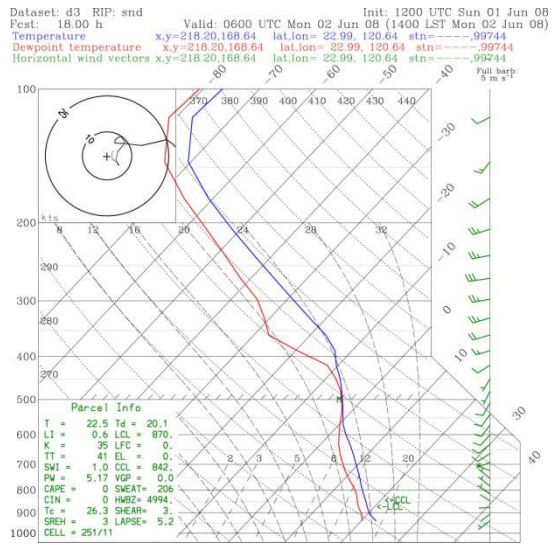


圖 5.6 恆春站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。

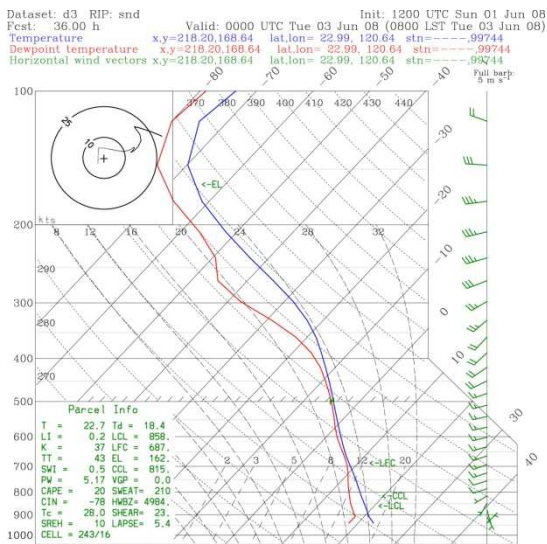
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

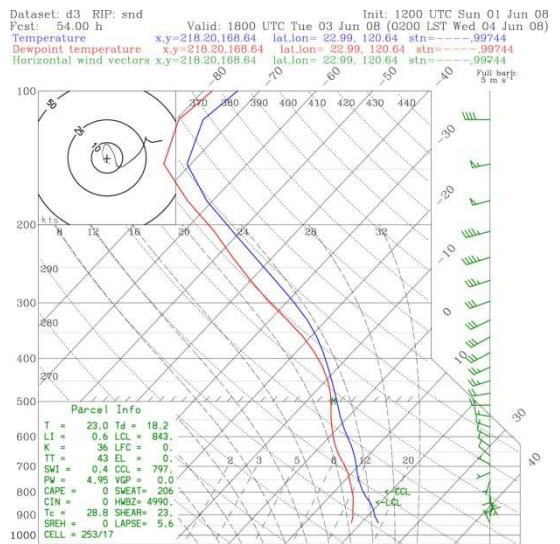
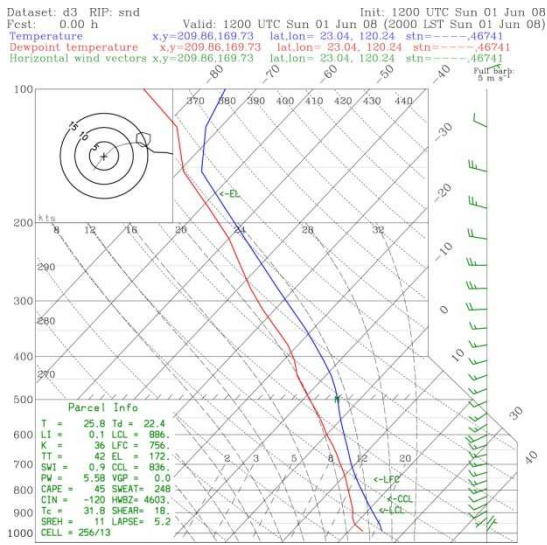
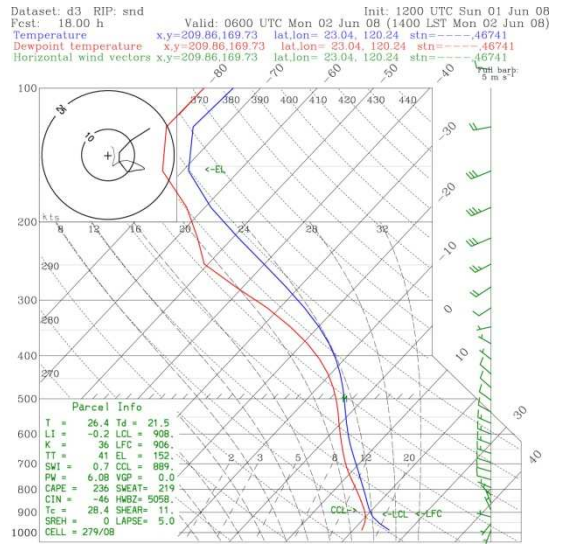


圖 5.7 六龜站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。

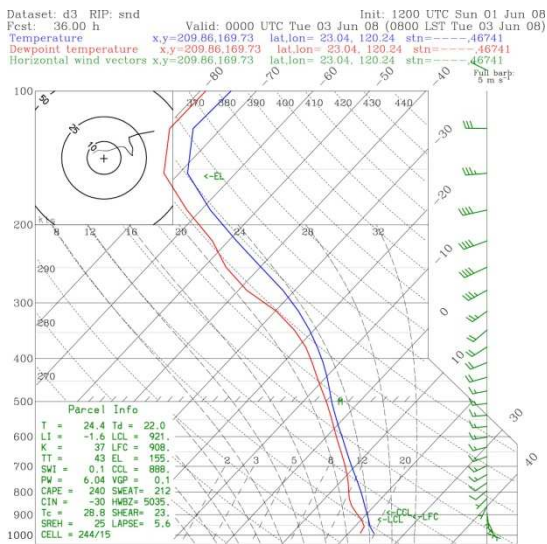
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

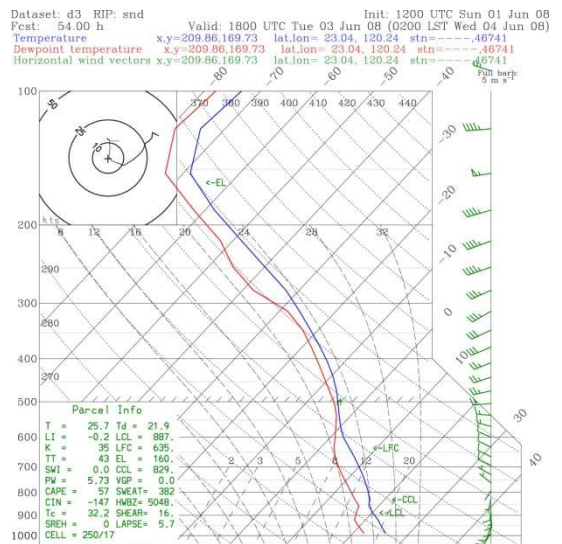
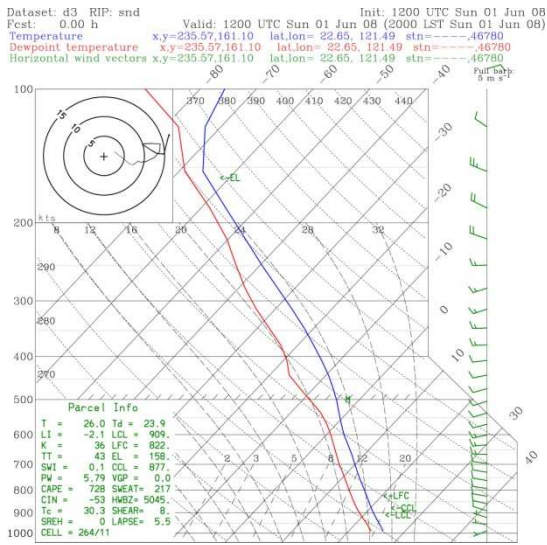
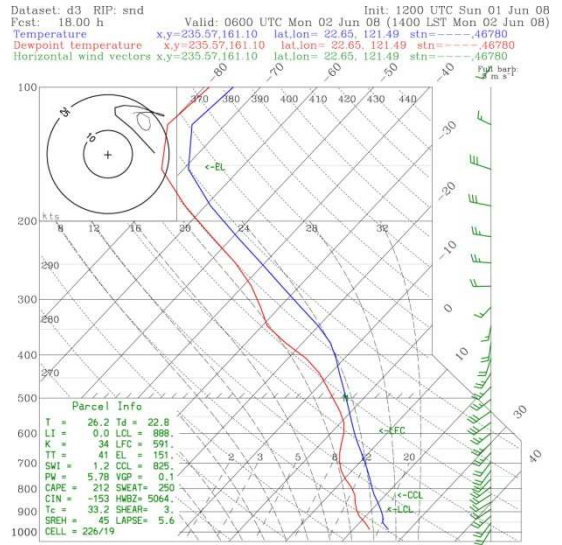


圖 5.8 台南站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。

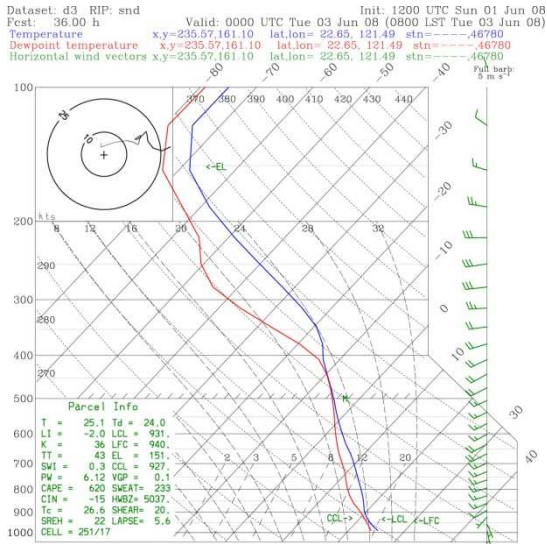
(a) 2008/6/1 1200UTC



(b) 2008/6/2 0600UTC



(c) 2008/6/3 0000UTC



(d) 2008/6/3 1800UTC

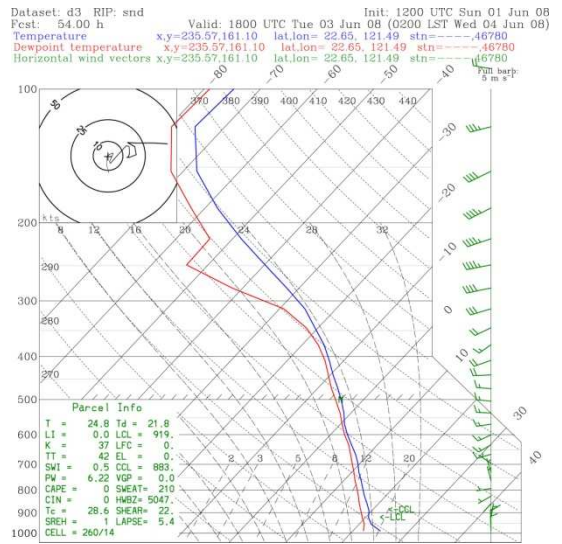
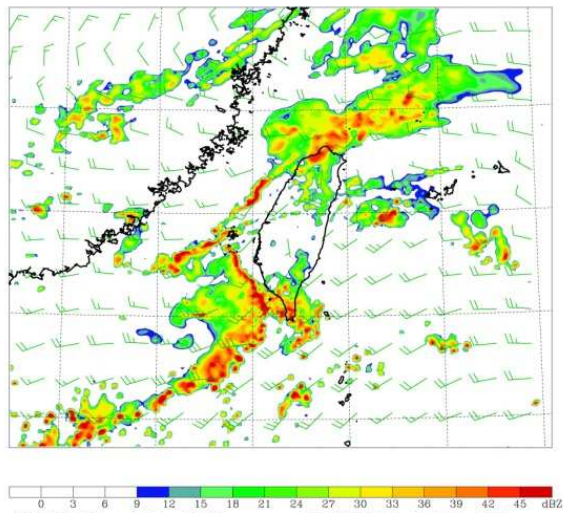
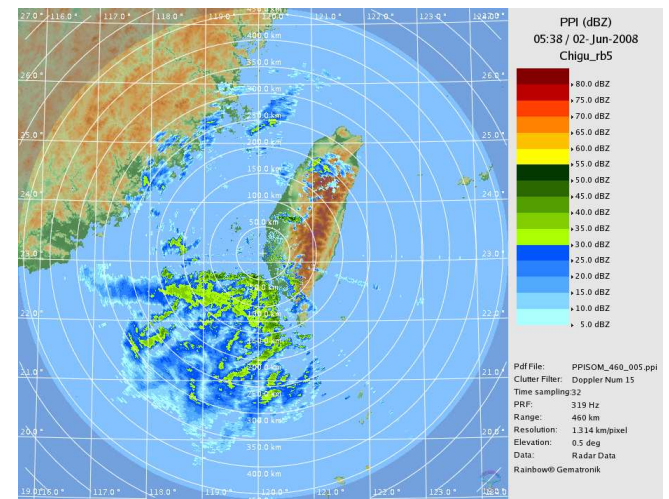


圖 5.9 綠島站模式探空圖。(a)(b)(c)(d)預報場時間同圖 5.4。

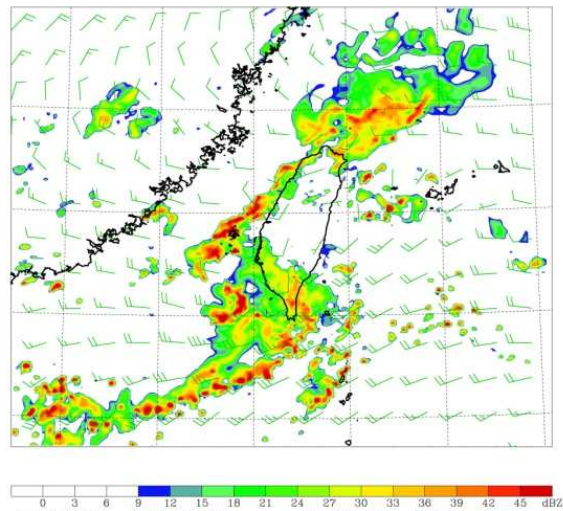
(a) 2008/6/2 0000UTC



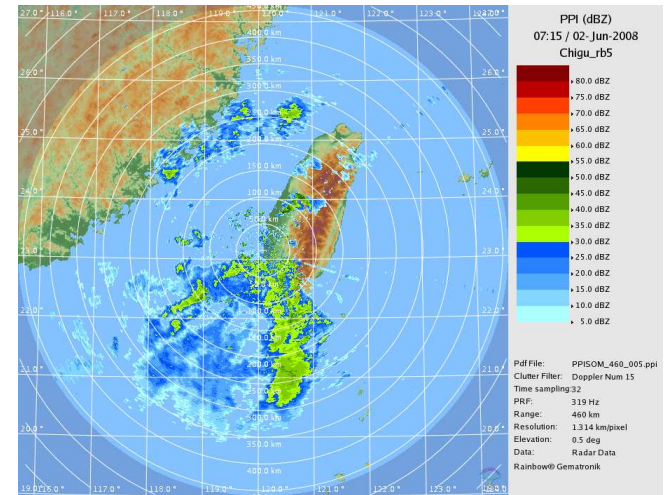
(b) 2008/6/2 0538UTC



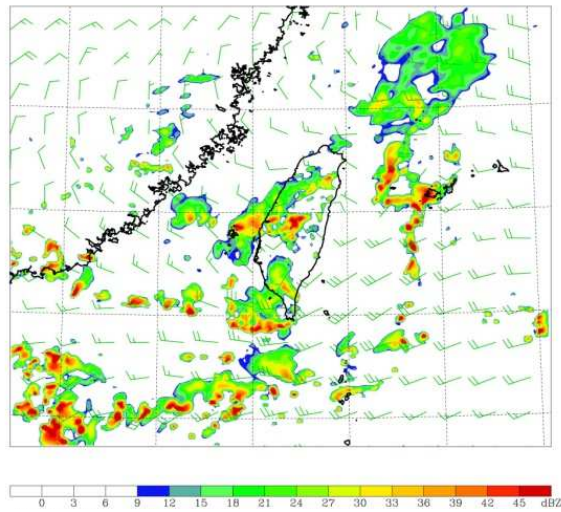
(c) 2008/6/2 0200UTC



(d) 2008/6/2 0715UTC



(e) 2008/6/2 0500UTC



(f) 2008/6/2 1245UTC

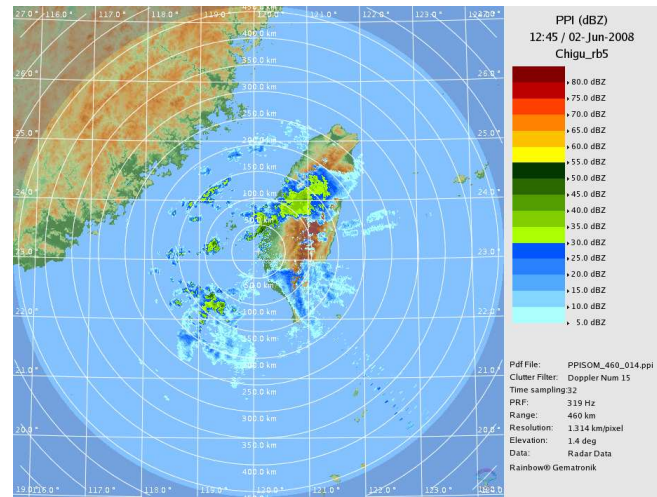
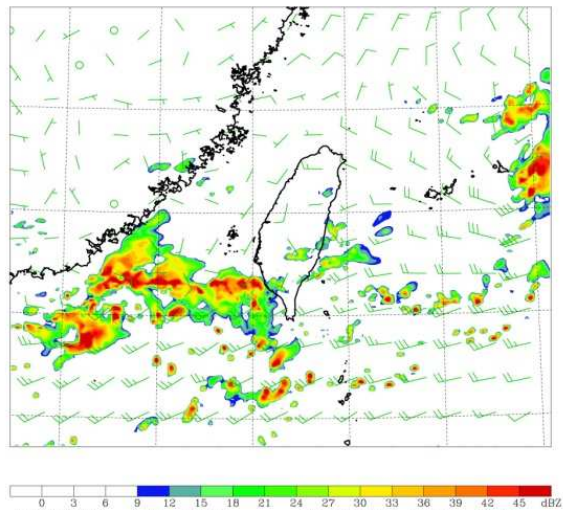
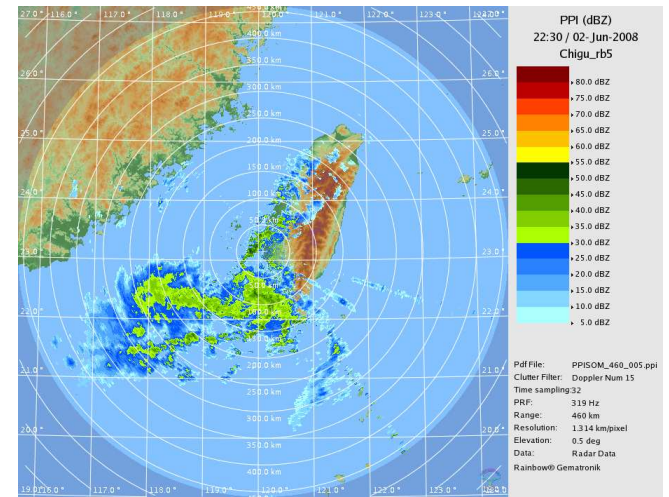


圖 5.10 為第一波降水系統登陸台灣西南部，到最後消散之主要演變過程。左欄是 WRF 模式模擬 MORI 實驗結果的第三層網域高度 1km 之雷達回波與 850hPa 風場圖，右欄為七股雷達回波觀測結果。左右欄各選取模擬降水系統與觀測降水系統發展之相近時期，而非以相同的絕對時間做對照。模式預報場的(a)時間為 2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(c)時間為 2008 年 6 月 2 日 0200UTC，(e)時間為 2008 年 6 月 2 日 0500UTC。七股雷達觀測的(b)時間為 2008 年 6 月 2 日 0538UTC，(d)時間為 2008 年 6 月 2 日 0715UTC，(f)時間為 2008 年 6 月 2 日 1245UTC。

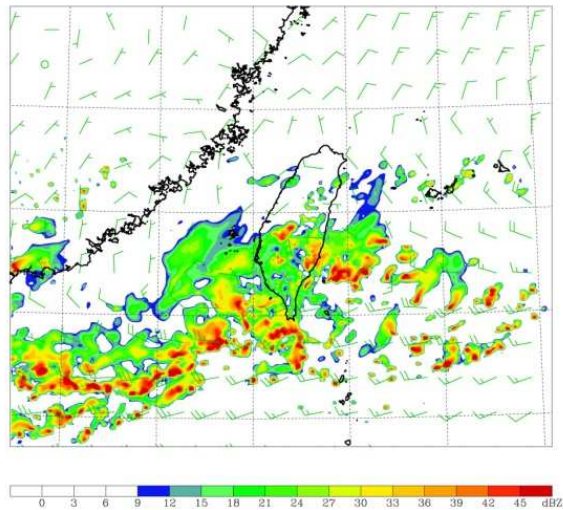
(a) 2008/6/3 0000UTC



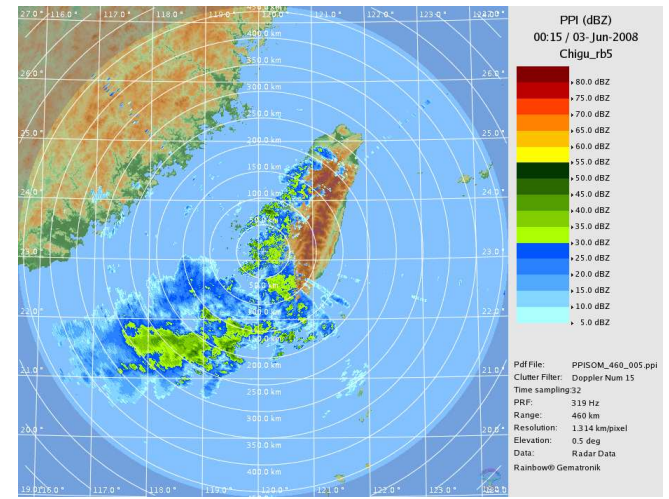
(b) 2008/6/2 2230UTC



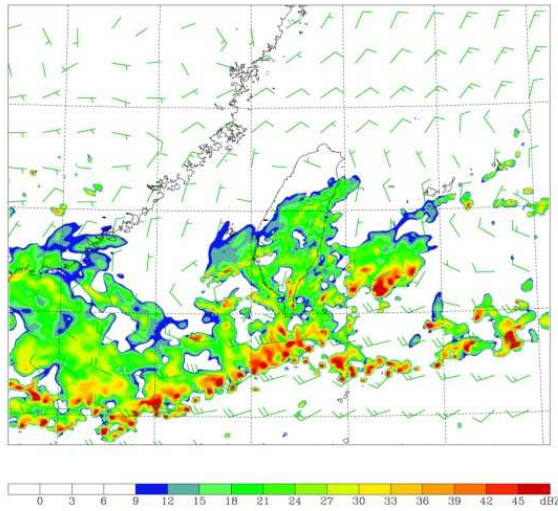
(c) 2008/6/3 0600UTC



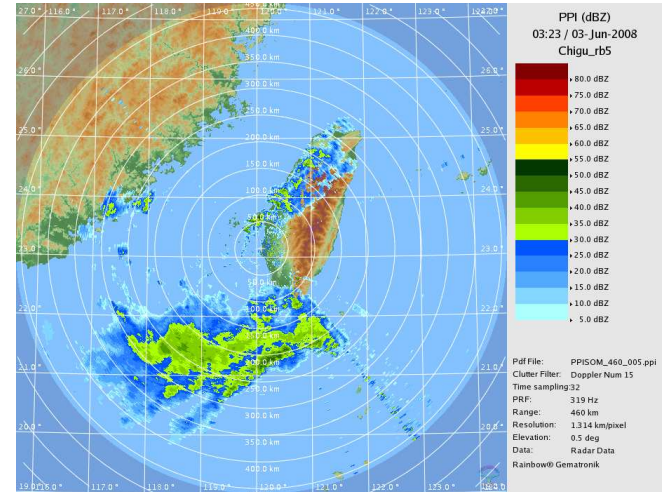
(d) 2008/6/3 0015UTC



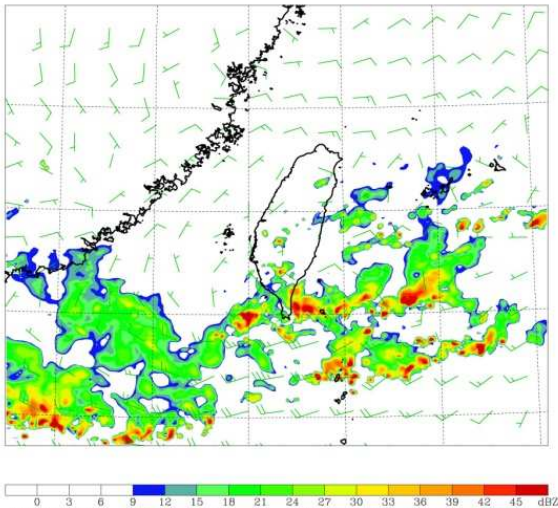
(e) 2008/6/3 0900UTC



(f) 2008/6/3 0323UTC



(g) 2008/6/3 1200UTC



(h) 2008/6/3 1138UTC

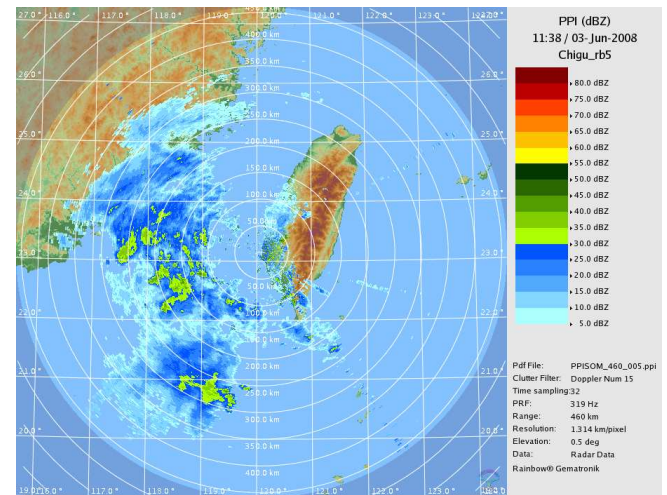
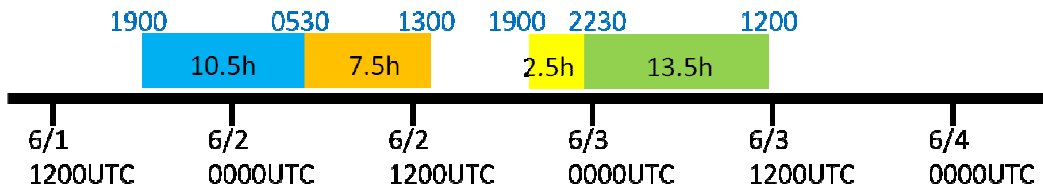


圖 5.11 為第二波降水系統登陸台灣西南部，到最後消散之主要演變過程。說明同圖 5.10。模式預報場的(a)時間為 2008 年 6 月 3 日 0000UTC，(c)時間為 2008 年 6 月 3 日 0600UTC，(e)時間為 2008 年 6 月 3 日 0900UTC，(g)時間為 2008 年 6 月 3 日 1200UTC。七股雷達觀測的(b)時間為 2008 年 6 月 2 日 2230UTC，(d)時間為 2008 年 6 月 3 日 0015UTC，(f)時間為 2008 年 6 月 3 日 0323UTC，(h)時間為 2008 年 6 月 3 日 1138UTC。

Observation:



Simulation:

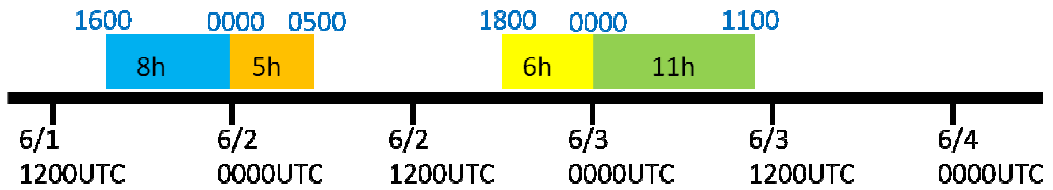
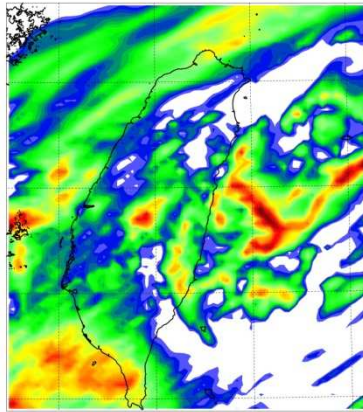
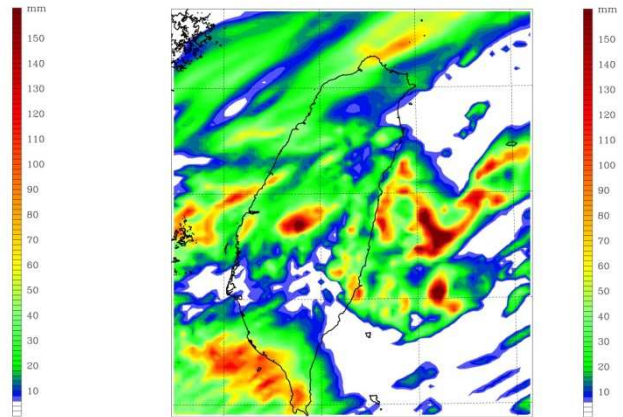


圖 5.12 為 SoWMEX IOP-4 個案期間，兩波降水系統演變過程之時序示意圖，上圖為觀測之降水系統，下圖為模擬的降水系統。第一波降水系統以藍色和橘色區塊表示，藍色區塊左側標示的時間點約為第一波降水系統在海上開始發展的時 間，藍色區塊與橘色區塊交接處標示的時間點為第一波降水系統前緣開始登陸台 灣西南部陸地的時間，橘色區塊右側的時間點為第一波降水系統大致上消散的時 間。第二波降水系統以黃色和綠色區塊表示，時間點區分與標示方法同第一波降 水系統。

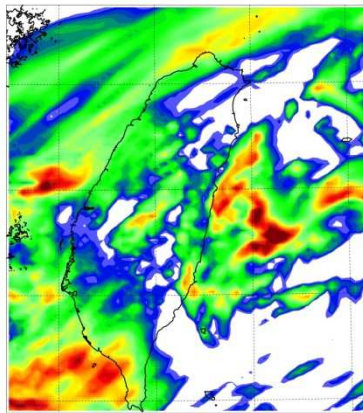
(a) MORI



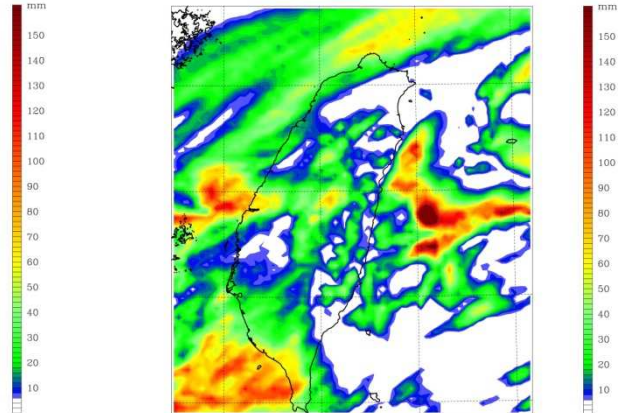
(b) THMN



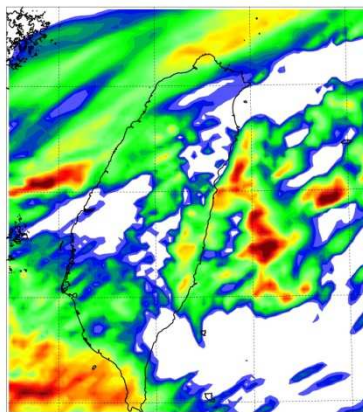
(c) WSM5



(d) WDM5



(e) WSM6



(f) WDM6

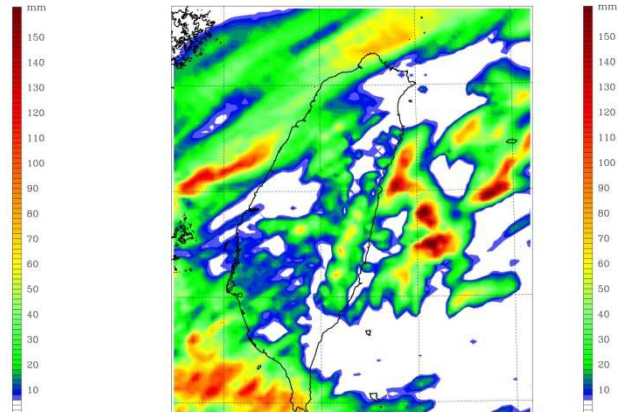


圖 5.13 為 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 6 月 2 日 1200UTC 之 24 小時地面累積降水圖。(a)為 MORI 實驗的結果，(b) THMN 實驗，(c) WSM5 實驗，(d) WDM5 實驗，(e) WSM6 實驗，(f) WDM6 實驗。

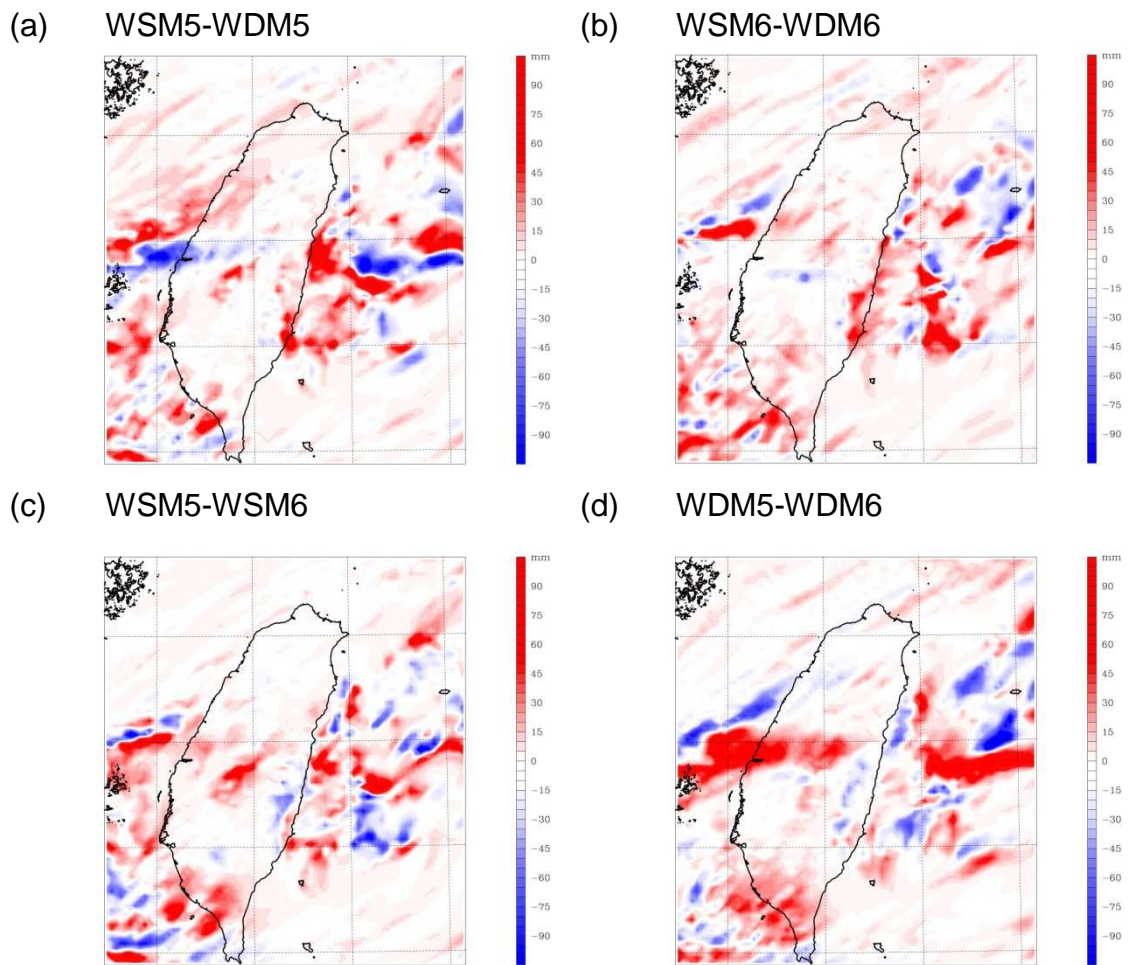


圖 5.14 為 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 之 24 小時地面累積降水差異圖。(a)為 WSM5 實驗與 WDM5 實驗的累積降水差異，(b)為 WSM6 實驗與 WDM6 實驗的累積降水差異，(c) 為 WSM5 實驗與 WSM6 實驗的累積降水差異，(d) 為 WDM5 實驗與 WDM6 實驗的累積降水差異。

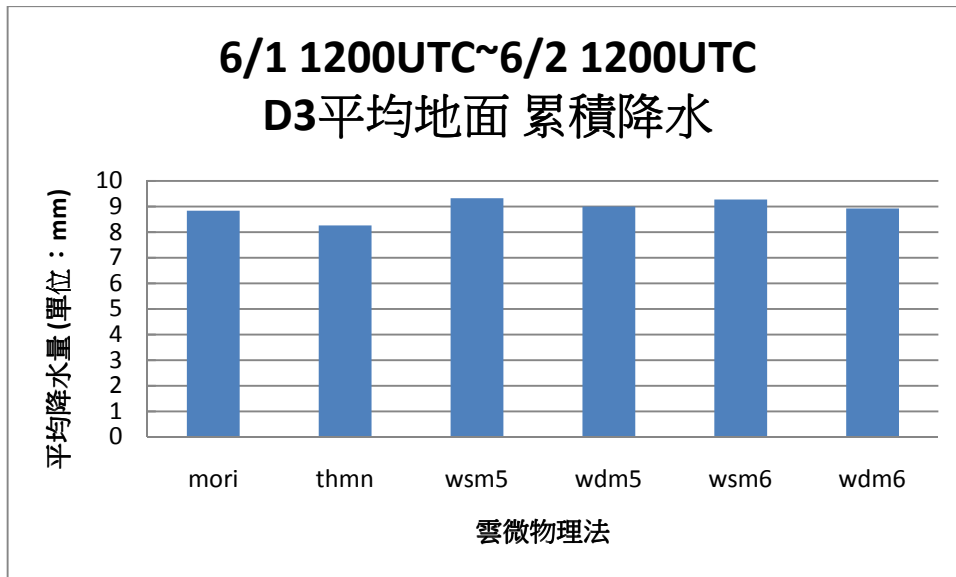


圖 5.15 為第三層網域 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 平均降水，分別使用六種雲微物理參數化方案的實驗結果。

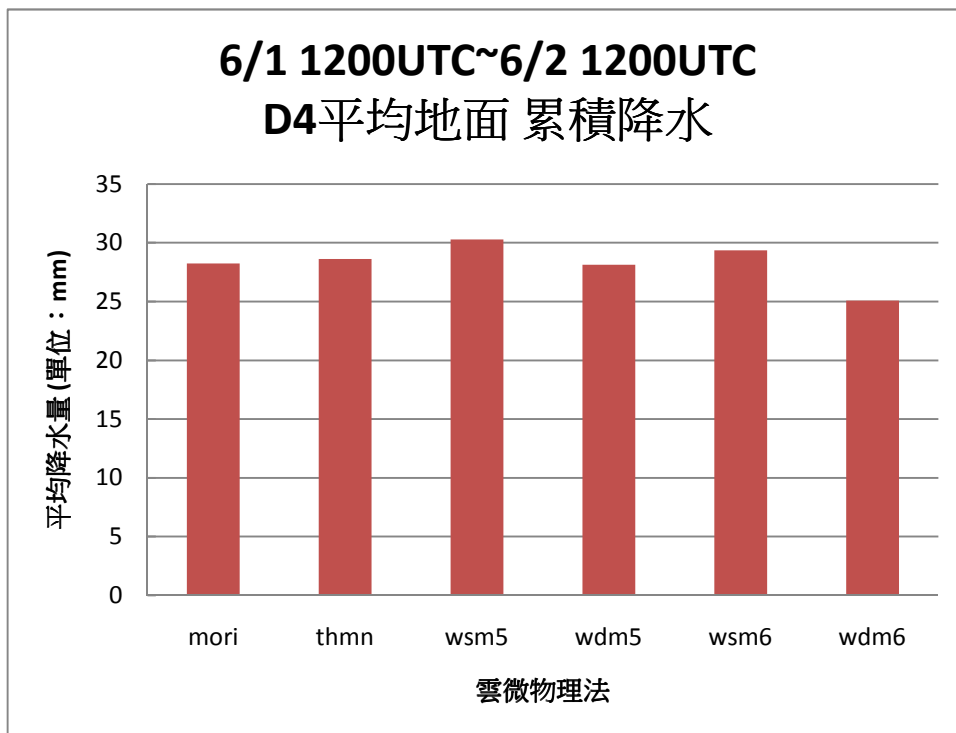


圖 5.16 為第四層網域 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 平均降水，分別使用六種雲微物理參數化方案的實驗結果。

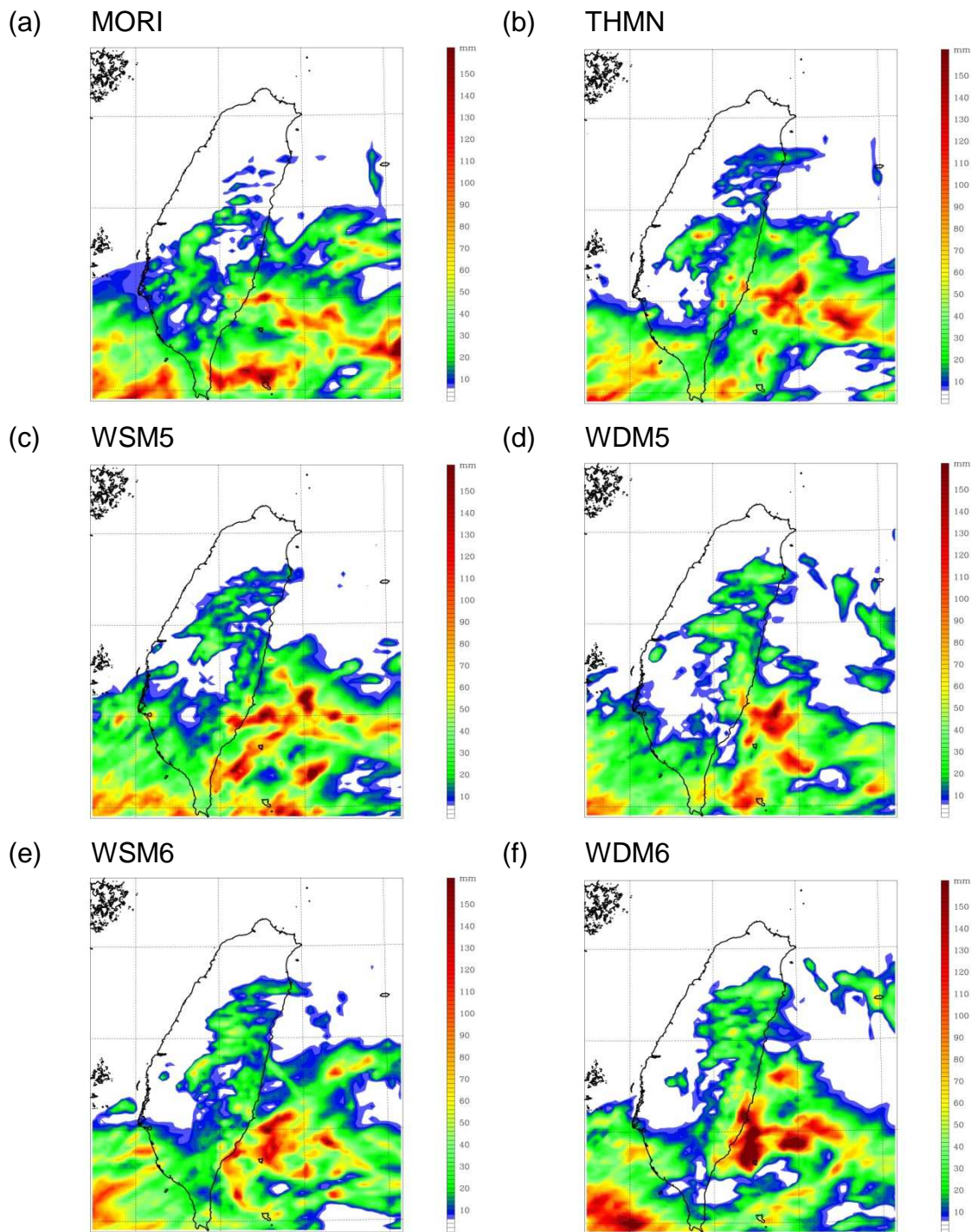
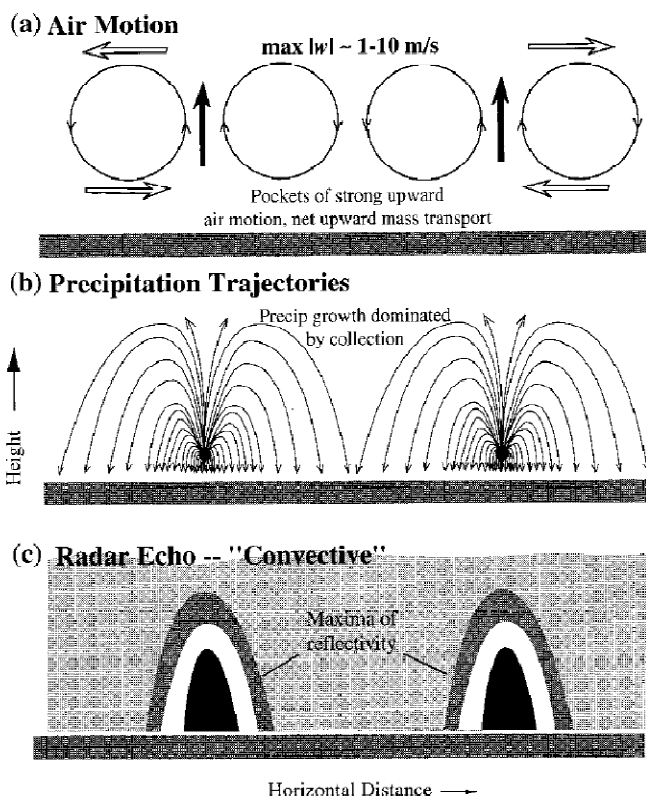


圖 5.17 為 2008 年 6 月 2 日 1600UTC 至 6 月 3 日 1600UTC 之 24 小時地面累積降水圖。(a) (b) (c) (d) (e) (f) 的說明同圖 5.13。

Vigorous Convection



Old Convection

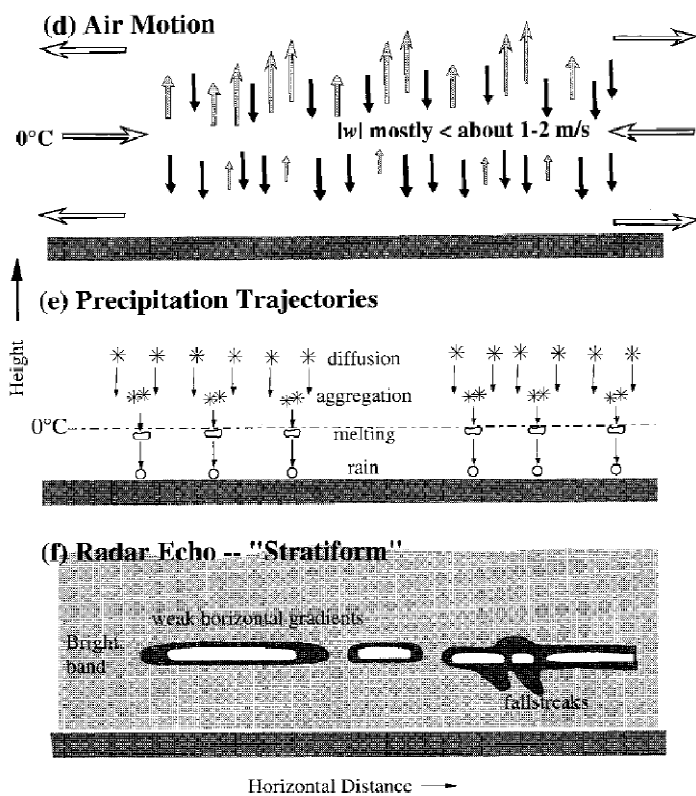
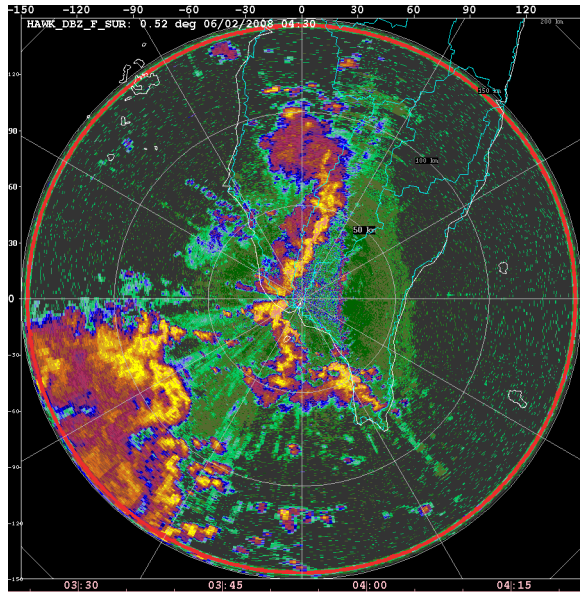
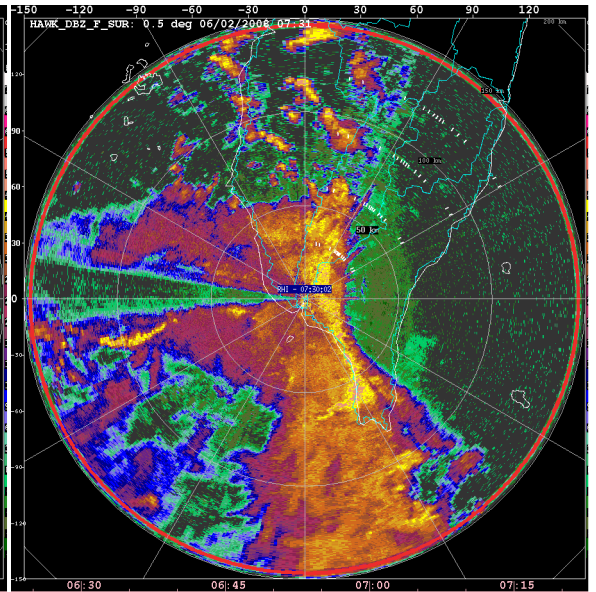


圖 5.18 對流降水與層狀降水之特徵區別示意圖，取自 Houze (1997)。(a)圖為對流降水之垂直運動場特徵；(b)圖為對流降水系統內部，降水粒子軌跡線特徵，碰撞合併作用為其主要的成長因素；(c)圖為對流降水系統的雷達回波垂直剖面之特徵；(d)圖為層狀降水之垂直運動場特徵；(e)圖為層狀降水系統內部，降水粒子軌跡線特徵；(f)圖為層狀降水系統的雷達回波垂直剖面之特徵。

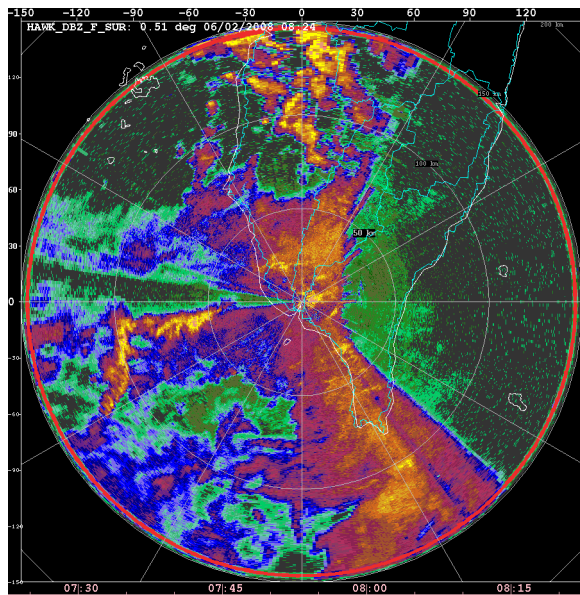
(a) 2008/6/2 0430UTC



(b) 2008/6/2 0731UTC



(c) 2008/6/2 0824UTC



(d) 2008/6/2 0946UTC

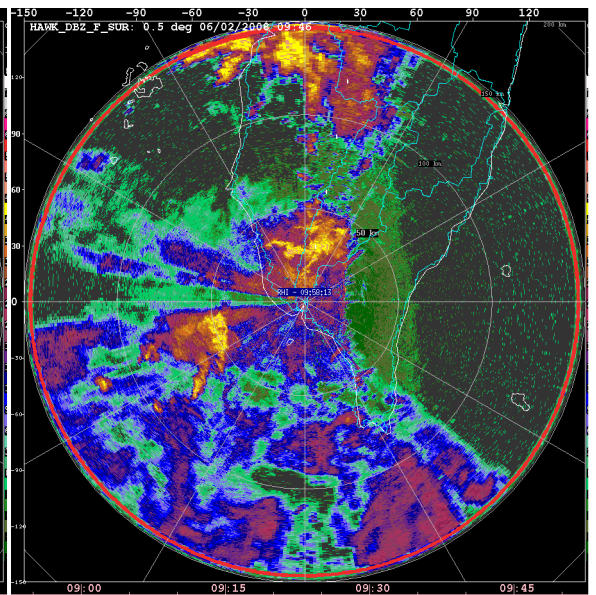
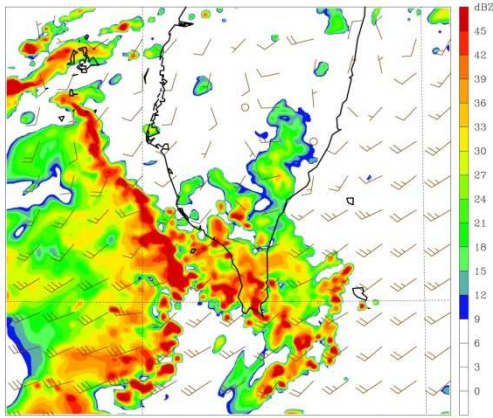


圖 5.19 為 NCAR/S-pol 0.5° 仰角之雷達回波觀測結果，(a)2008 年 6 月 2 日 0430UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0731UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0824UTC，(d)2008 年 6 月 2 日 0946UTC。

(a) 2008/6/2 0000UTC

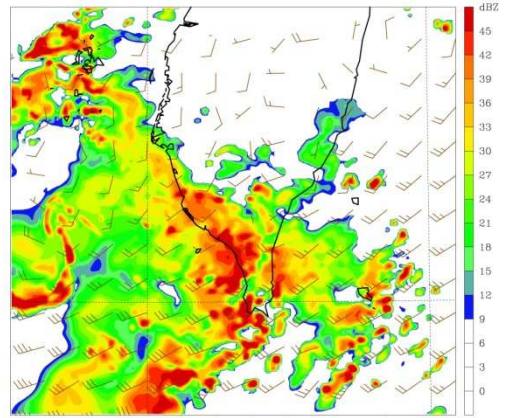
Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0000 UTC Mon 02 Jun 08 (0800 LST Mon 02 Jun 08) Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 12.00 h at height = 1.00 km
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km



Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(b) 2008/6/2 0100UTC

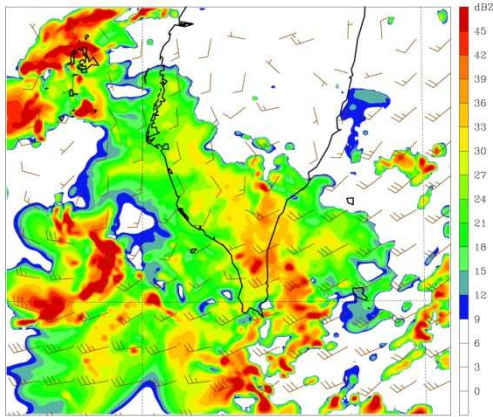
Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0100 UTC Mon 02 Jun 08 (0900 LST Mon 02 Jun 08) Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 13.00 h at height = 1.00 km
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km



Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(c) 2008/6/2 0200UTC

Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0200 UTC Mon 02 Jun 08 (1000 LST Mon 02 Jun 08) Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 14.00 h at height = 1.00 km
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km

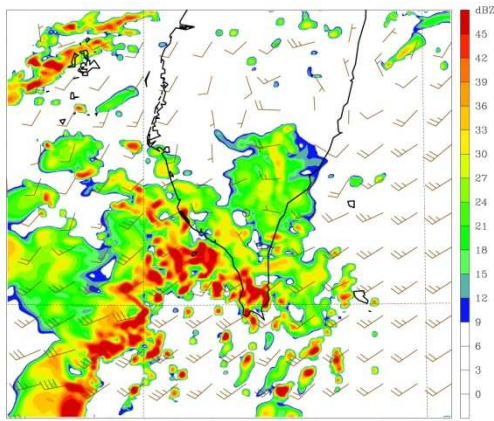


Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

圖 5.20 為 MORI 實驗的第四層網域 WRF 模式模擬雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0200UTC。

(a) 2008/6/2 0000UTC

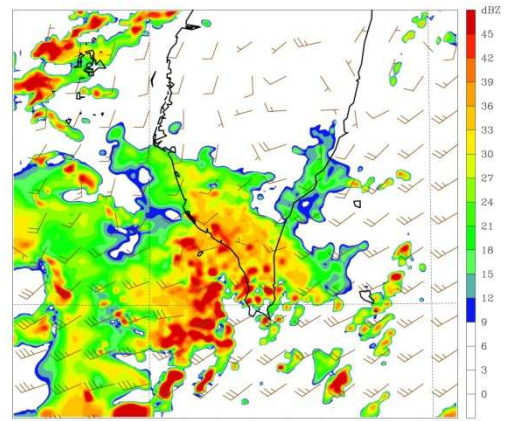
Dataset: d4 RIP: rr Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 12.00 h Valid: 0000 UTC Mon 02 Jun 08 (0800 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km



Model Info: V3.1 RAMP VECTORS: FULL BARB = 5 in s^{-1}
No Cu YSU PBL Thompson Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(b) 2008/6/2 0100UTC

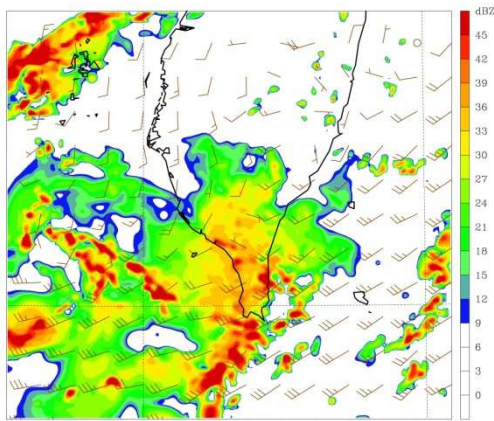
Dataset: d4 RIP: rr Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 13.00 h Valid: 0100 UTC Mon 02 Jun 08 (0900 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km



Model Info: V3.1 RAMP VECTORS: FULL BARB = 5 in s^{-1}
No Cu YSU PBL Thompson Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

(c) 2008/6/2 0200UTC

Dataset: d4 RIP: rr Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 14.00 h Valid: 0200 UTC Mon 02 Jun 08 (1000 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km

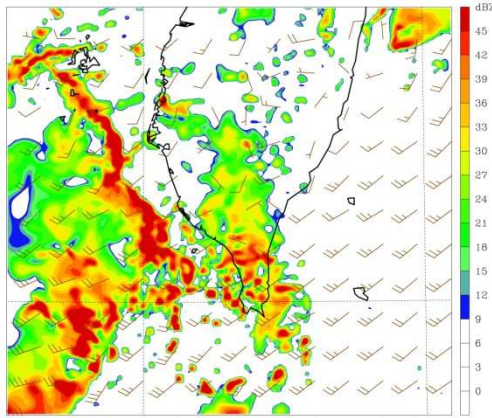


Model Info: V3.1 RAMP VECTORS: FULL BARB = 5 in s^{-1}
No Cu YSU PBL Thompson Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DIFF: simple KM: 2D Smagor

圖 5.21 為 THMN 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0200UTC。

(a) 2008/6/1 2300UTC

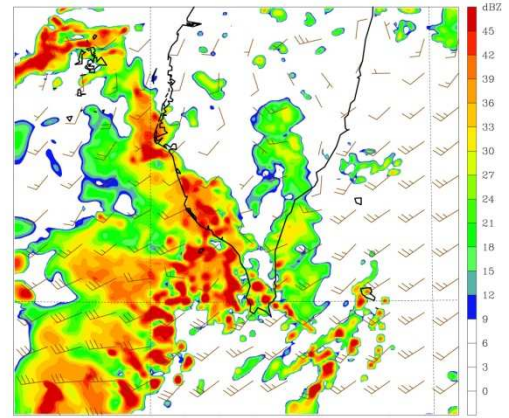
Dataset: d4 RIP: rr
Fest: 11.00 h
Reflectivity ()
Horizontal wind vectors
Valid: 2300 UTC Sun 01 Jun 08
at height = 1.00 km
Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
(0700 LST Mon 02 Jun 08)
at height = 1.00 km



Model Info: V3.1
No Cu YSU PBL WSM Sclass Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(b) 2008/6/2 0000UTC

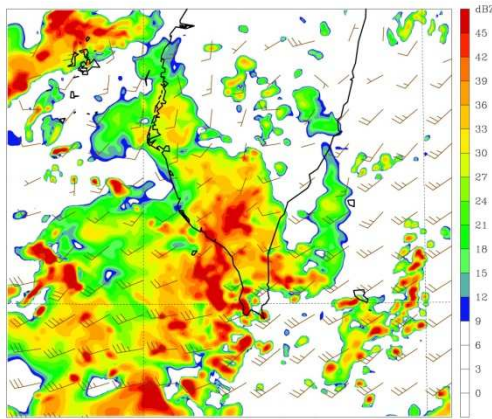
Dataset: d4 RIP: rr
Fest: 12.00 h
Reflectivity ()
Horizontal wind vectors
Valid: 0000 UTC Mon 02 Jun 08
at height = 1.00 km
Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
(0800 LST Mon 02 Jun 08)
at height = 1.00 km



Model Info: V3.1
No Cu YSU PBL WSM Sclass Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(c) 2008/6/2 0100UTC

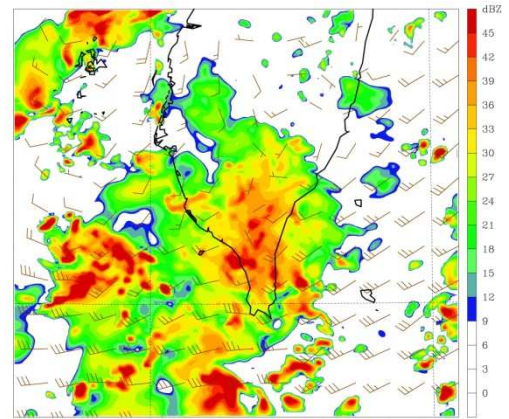
Dataset: d4 RIP: rr
Fest: 13.00 h
Reflectivity ()
Horizontal wind vectors
Valid: 0100 UTC Mon 02 Jun 08
at height = 1.00 km
Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
(0900 LST Mon 02 Jun 08)
at height = 1.00 km



Model Info: V3.1
No Cu YSU PBL WSM Sclass Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(d) 2008/6/2 0200UTC

Dataset: d4 RIP: rr
Fest: 14.00 h
Reflectivity ()
Horizontal wind vectors
Valid: 0200 UTC Mon 02 Jun 08
at height = 1.00 km
Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
(1000 LST Mon 02 Jun 08)
at height = 1.00 km

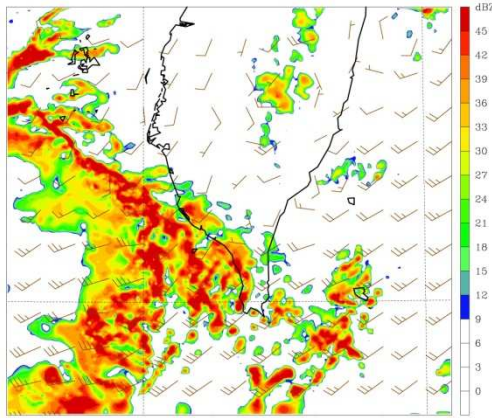


Model Info: V3.1
No Cu YSU PBL WSM Sclass Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

圖 5.22 為 WSM5 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 1 日 2300UTC, (b)2008 年 6 月 2 日 0000UTC, (c)2008 年 6 月 2 日 0100UTC, (d)2008 年 6 月 2 日 0200UTC。

(a) 2008/6/2 0000UTC

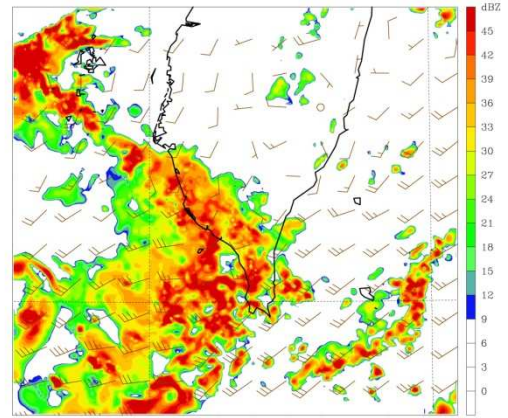
Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0000 UTC Mon 02 Jun 08 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 12.00 h at height = 1.00 km (0800 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km



Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(b) 2008/6/2 0100UTC

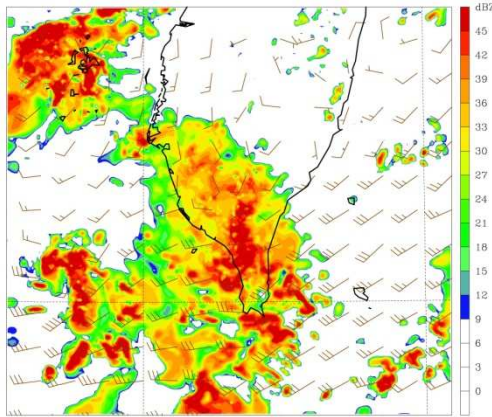
Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0100 UTC Mon 02 Jun 08 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 13.00 h at height = 1.00 km (0900 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km



Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(c) 2008/6/2 0200UTC

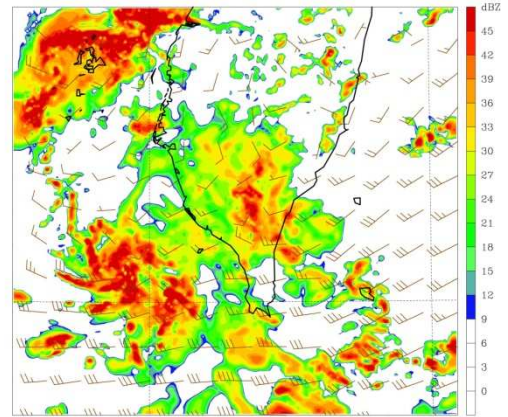
Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0200 UTC Mon 02 Jun 08 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 14.00 h at height = 1.00 km (1000 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km



Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(d) 2008/6/2 0300UTC

Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0300 UTC Mon 02 Jun 08 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 15.00 h at height = 1.00 km (1100 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors at height = 1.00 km

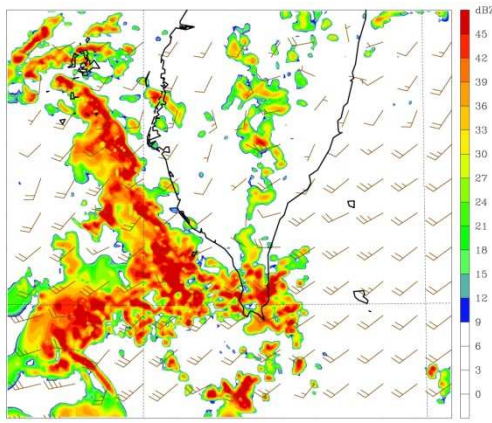


Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

圖 5.23 為 WDM5 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 2 日 0000UTC, (b)2008 年 6 月 2 日 0100UTC, (c)2008 年 6 月 2 日 0200UTC, (d)2008 年 6 月 2 日 0300UTC。

(a) 2008/6/1 2300UTC

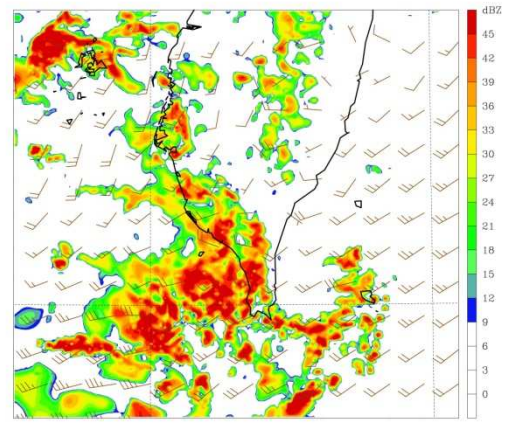
Dataset: d4 RIP: rr Valid: 2300 UTC Sun 01 Jun 08 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 11.00 h at height = 1.00 km (0700 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors



Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(b) 2008/6/2 0000UTC

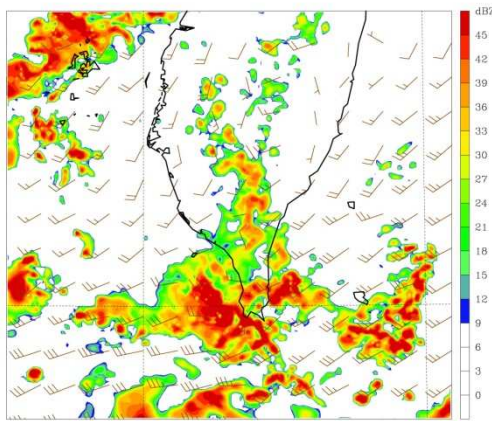
Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0000 UTC Mon 02 Jun 08 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 12.00 h at height = 1.00 km (0800 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors



Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

(c) 2008/6/2 0100UTC

Dataset: d4 RIP: rr Valid: 0100 UTC Mon 02 Jun 08 Init: 1200 UTC Sun 01 Jun 08
Fest: 13.00 h at height = 1.00 km (0900 LST Mon 02 Jun 08)
Reflectivity () at height = 1.00 km
Horizontal wind vectors



Model Info: V3.1 No Cu YSU PBL Ther-Diff 1.7 km, 31 levels, 7 sec
LW: RRTM SW: Dudhia DFF: simple KM: 2D Smagor

圖 5.25 為 WDM6 實驗的第四層網域雷達回波與風場圖。(a)2008 年 6 月 1 日 2300UTC，(b)2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(c)2008 年 6 月 2 日 0100UTC。

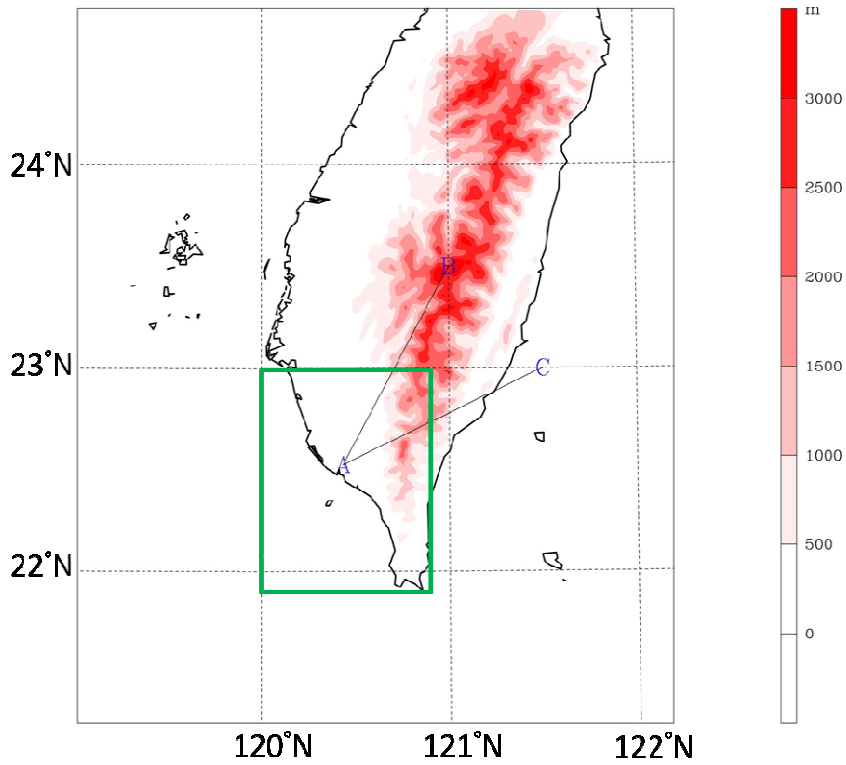
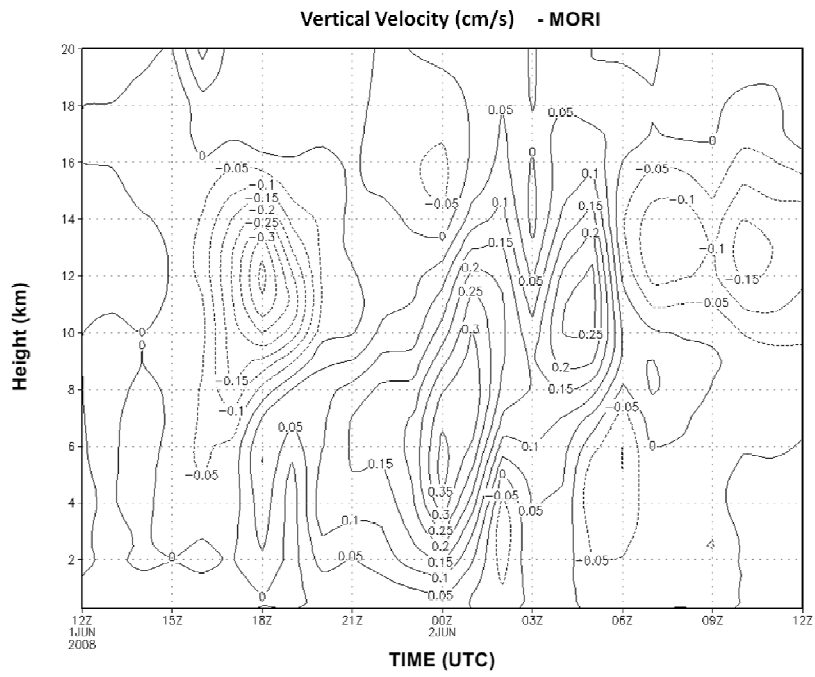
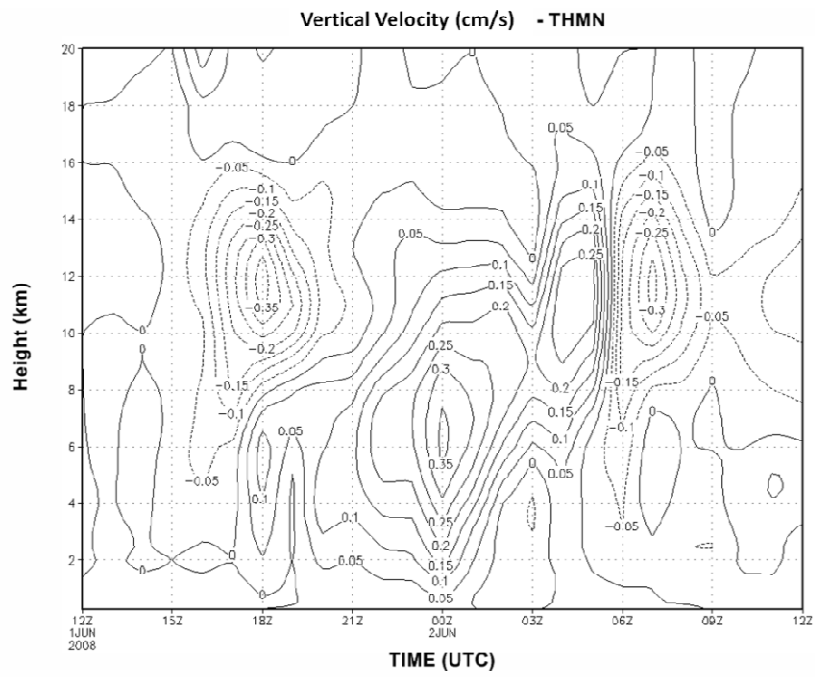


圖 5.26 紅色色階表示地形高度。綠色方框的範圍是東經 $120.0^{\circ} \sim 120.9^{\circ}$ 、北緯 $21.9^{\circ} \sim 23.0^{\circ}$ ，為圖 5.27、圖 5.36 和圖 5.37 計算平均場的範圍。圖中 A 點是 NCAR/S-pol 雷達在 SoWMEX 實驗期間設置的位置($120.4345^{\circ} \text{E}$, $22.52693^{\circ} \text{N}$)，AB 連線為圖 5.33 和圖 5.35 的垂直剖面基準線，AC 連線為圖 5.29 和圖 5.31 的垂直剖面基準線。

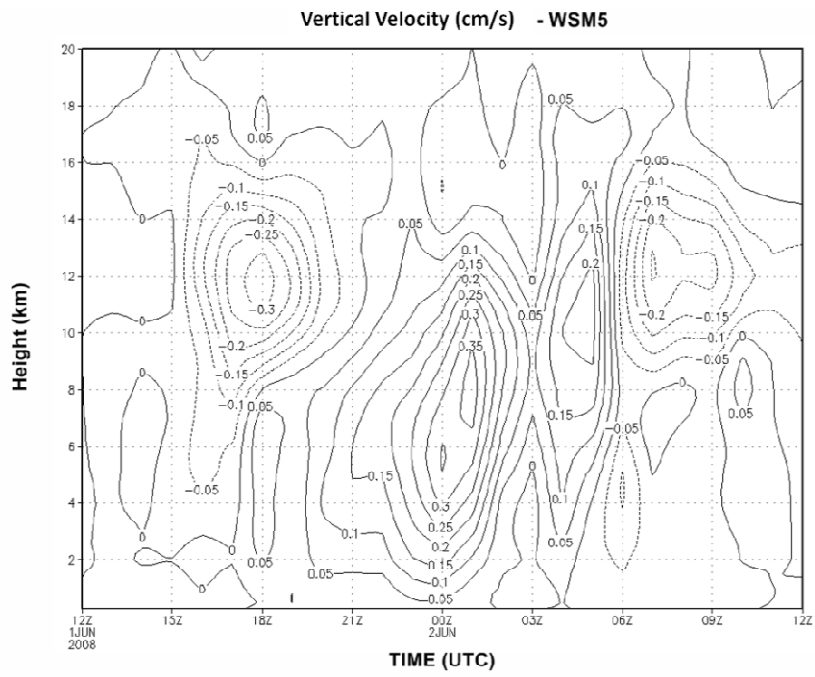
(a)



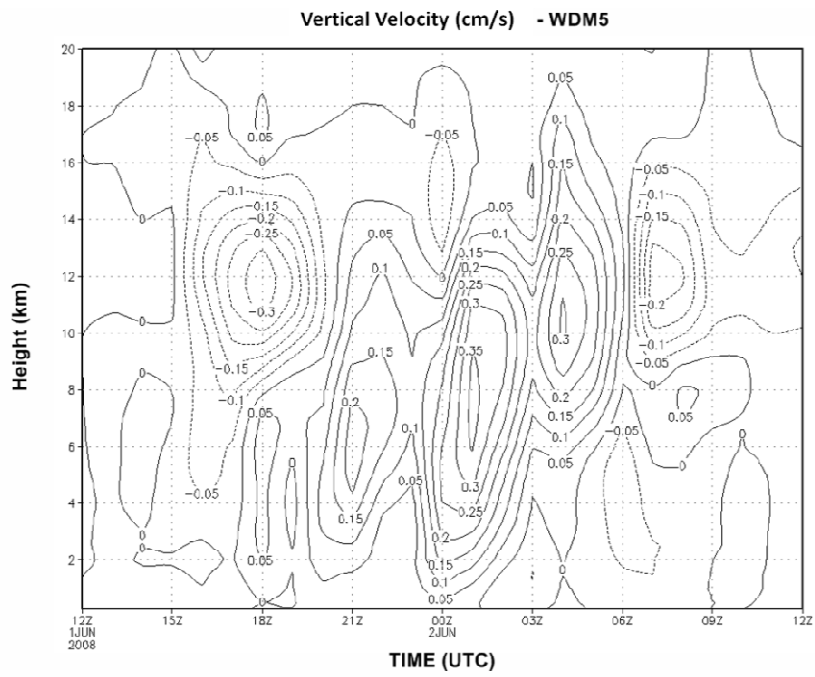
(b)



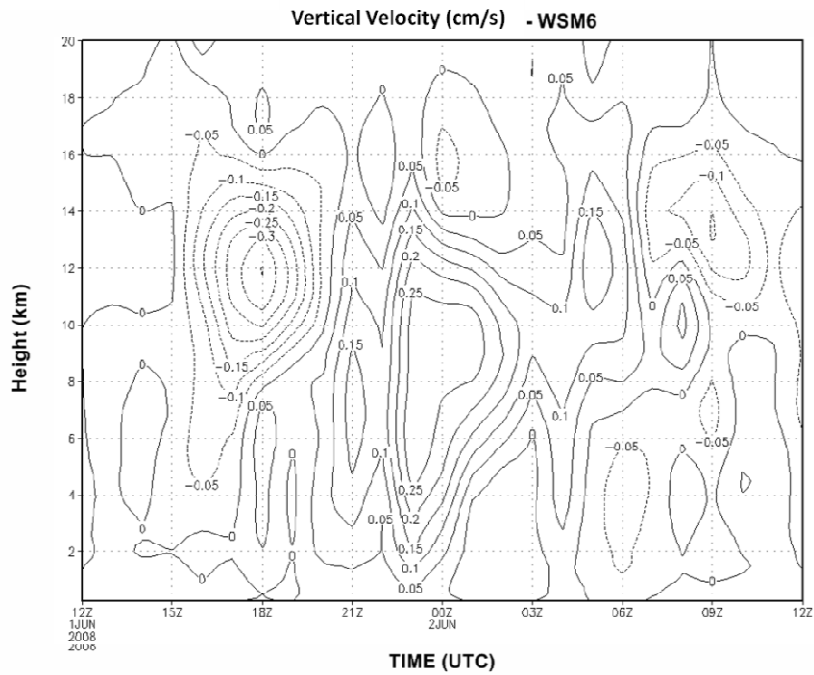
(c)



(d)



(e)



(f)

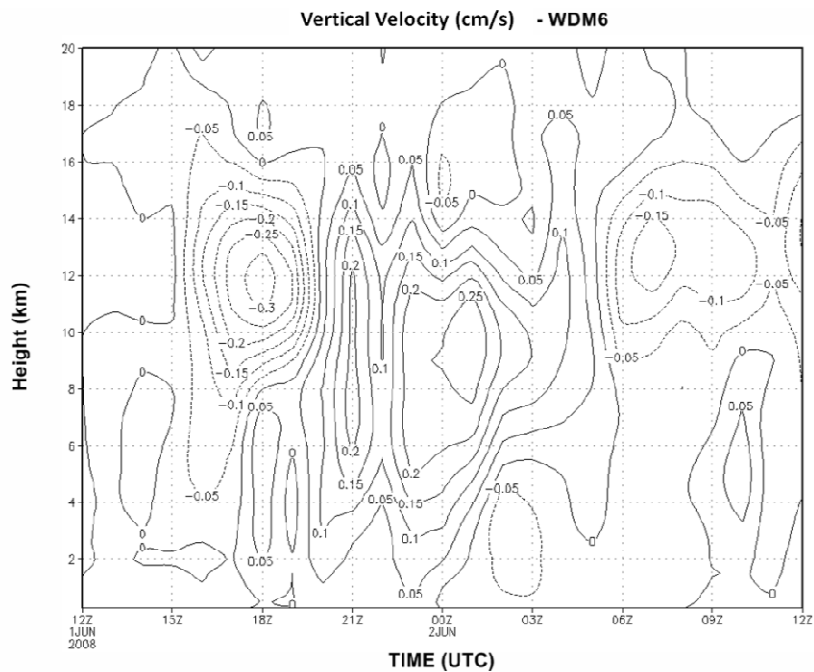


圖 5.27 為圖 5.26 綠色方框範圍內之垂直速度的平均值對高度及時間做圖，黑色實線表示垂直速度為正值，黑色虛線表示垂直速度為負值，等值線間距為 0.05cm/s。(a)是 MORI 實驗的結果，(b)是 THMN 實驗的結果，(c)是 WSM5 實驗的結果，(d)是 WDM5 實驗的結果，(e)是 WSM6 實驗的結果，(f)是 WDM6 實驗的結果。

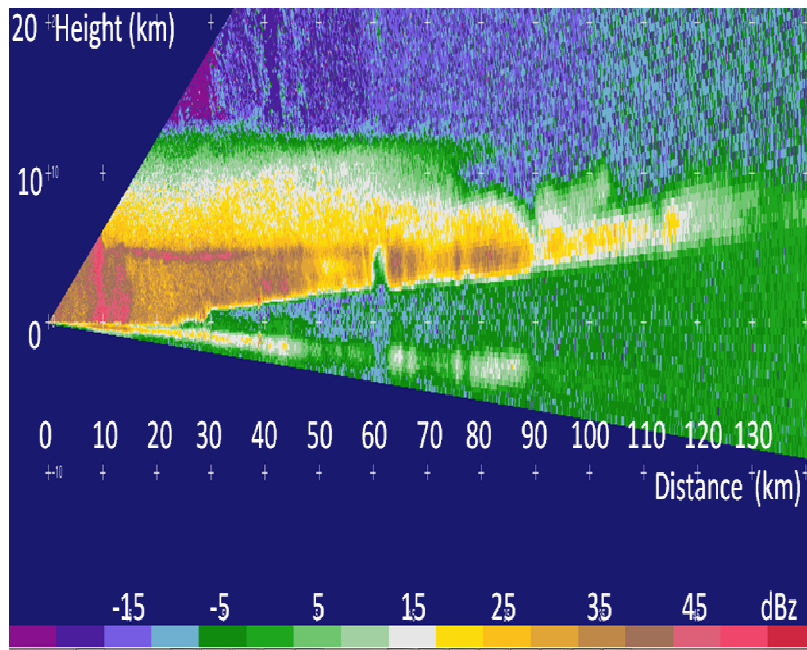
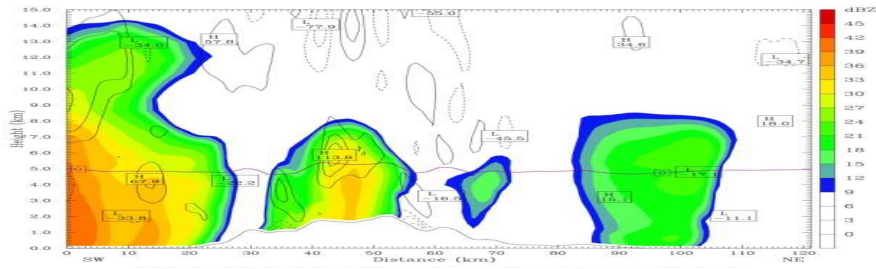
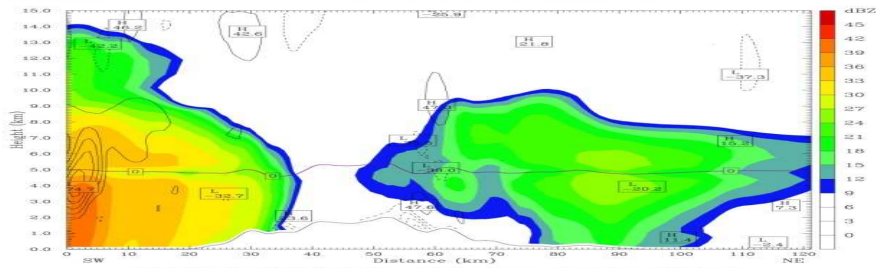


圖 5.28 是 NCAR/S-pol 雷達回波於 2008 年 6 月 2 日 0729 UTC 的 RHI (range-height indicator) 掃描觀測結果，方位角為 60° 。

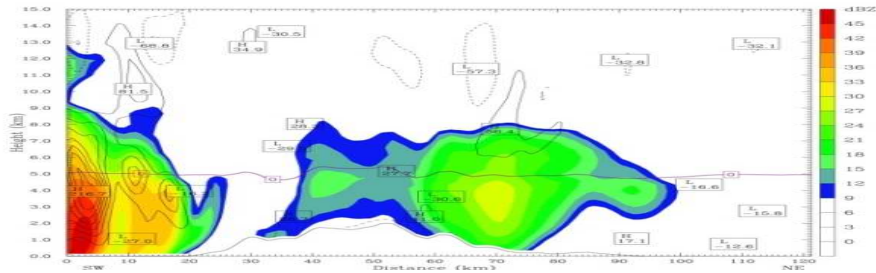
(a) MORI 2008/6/2 0100 UTC



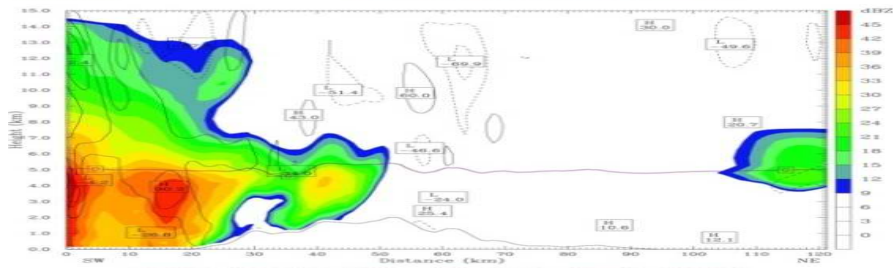
(b) THMN 2008/6/2 0100 UTC



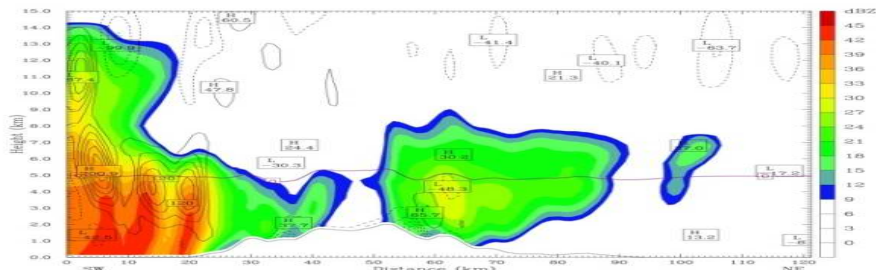
(c) WSM5 2008/6/2 0000 UTC



(d) WDM5 2008/6/2 0100 UTC



(e) WSM6 2008/6/2 0000 UTC



(f) WDM6 2008/6/2 0000 UTC

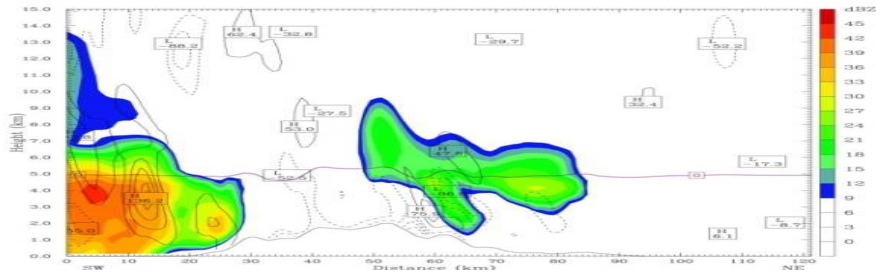


圖 5.29 第四層網域取圖 5.26 中 AC 連線的垂直剖面與左右各 8.35 公里，模擬的雷達回波和垂直速度側向平均值。色階為雷達回波，色階間隔為 3dBz；黑色實線表示垂直速度為正值，黑色虛線表示垂直速度為負值，等值線間距皆為 30cm/s；高度 5 公里左右的零值線為 0°C 等溫線。(a)是 MORI 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的模擬結果，(b)是 THMN 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(c)是 WSM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(d)是 WDM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(e)是 WSM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC，(f)是 WDM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC。

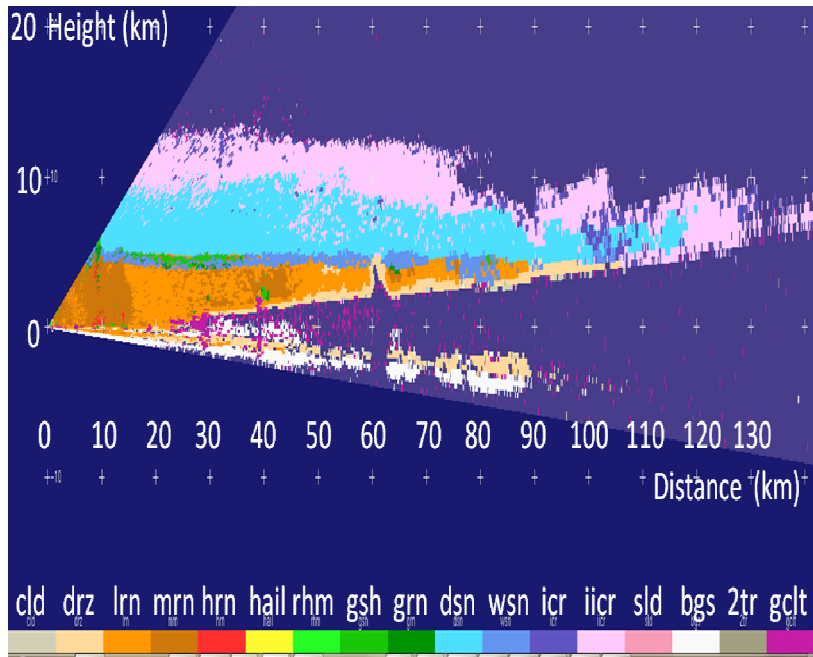
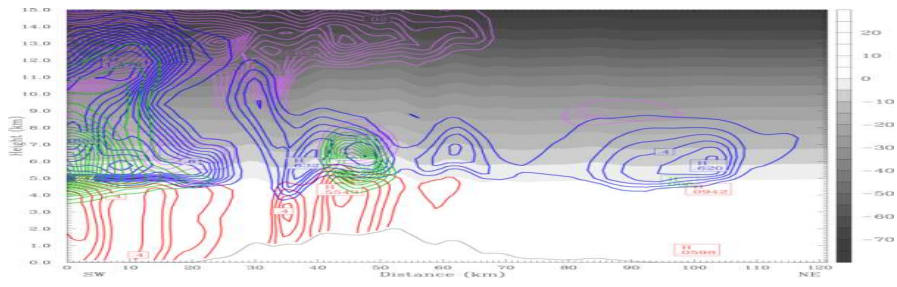
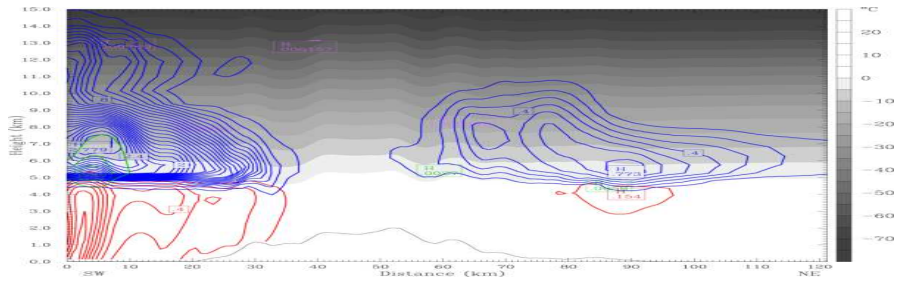


圖 5.30 NCAR/S-pol 雷達資料辨識的水相粒子分類圖。掃描時間為 2008 年 6 月 2 日 0729 UTC 的 RHI (range-height indicator)，方位角為 60° 。色塊所相對應的粒子種類，從左而右依序是雲滴(cld)、毛雨(drz)、小雨(lrn)、中雨(mrn)、大雨(hrn)、冰雹(hail)、雨和冰雹混合(rhm)、軟雹和小冰雹(gsh)、軟雹和雨(grn)、乾雪(dsn)、溼雪(wsn)、冰晶(icr)、不規則冰晶(iicr)、過冷水(sld)、昆蟲(bgs)、二次回波(2tr)、地形回波(gclt)。

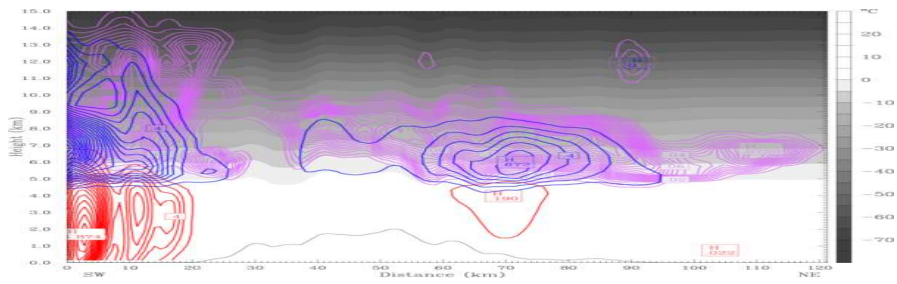
(a) MORI 2008/6/2 0100 UTC



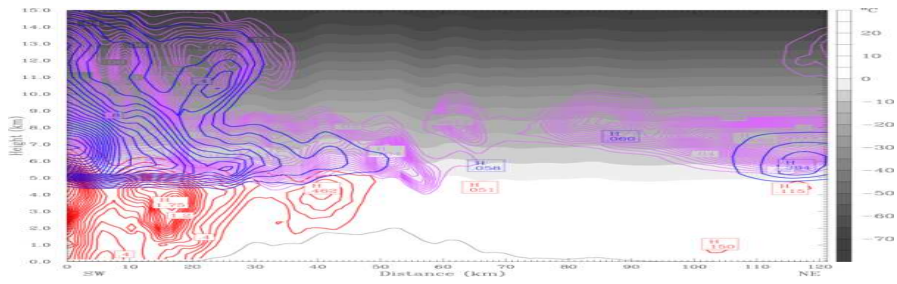
(b) THMN 2008/6/2 0100 UTC



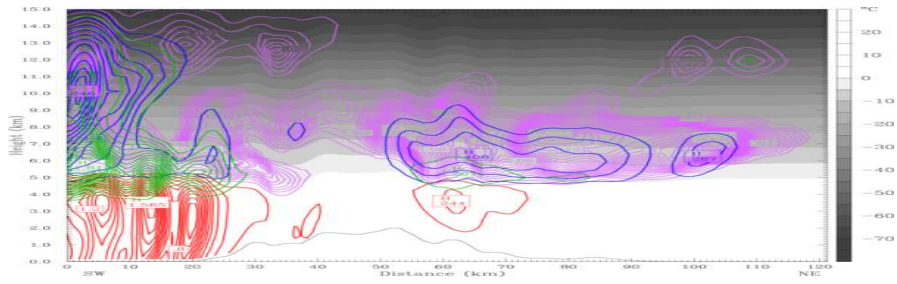
(c) WSM5 2008/6/2 0000 UTC



(d) WDM5 2008/6/2 0100 UTC



(e) WSM6 2008/6/2 0000 UTC



(f) WDM6 2008/6/2 0000 UTC

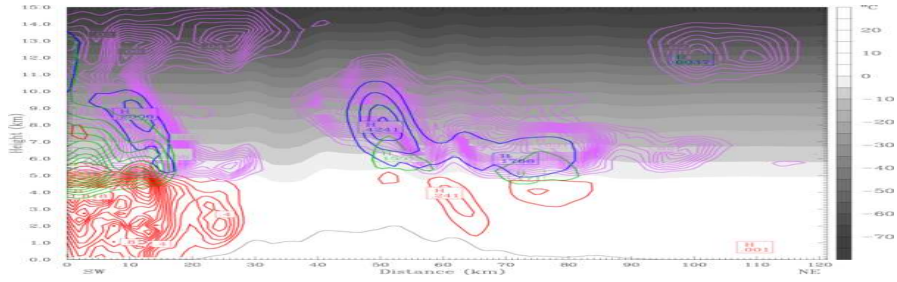


圖 5.31 第四層網域取圖 5.26 中 AC 連線的垂直剖面與左右各 8.35 公里，模擬的水相粒子質量混合比和融化層以上之溫度的側向平均值。紫色為雲冰混合比等值線，等值線間距為 0.005g/kg；藍色為雪混合比等值線，等值線間距為 0.1g/kg；綠色為軟雹混合比等值線，等值線間距為 0.05g/kg；紅色為雨水混合比等值線，等值線間距為 0.05g/kg。(a) (b) (c) (d) (e) (f)的說明同圖 5.29。

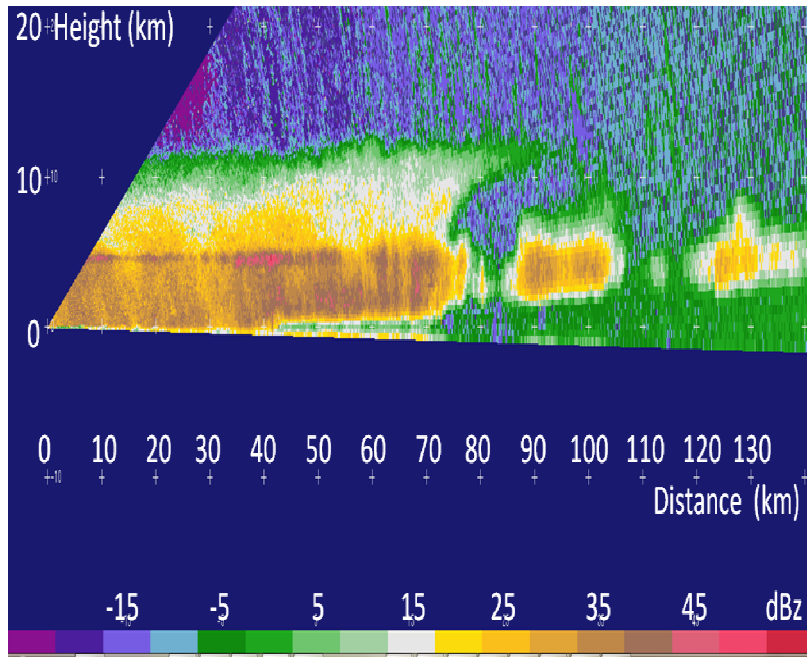
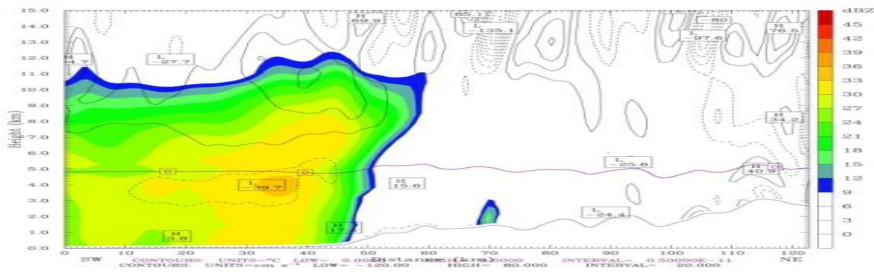
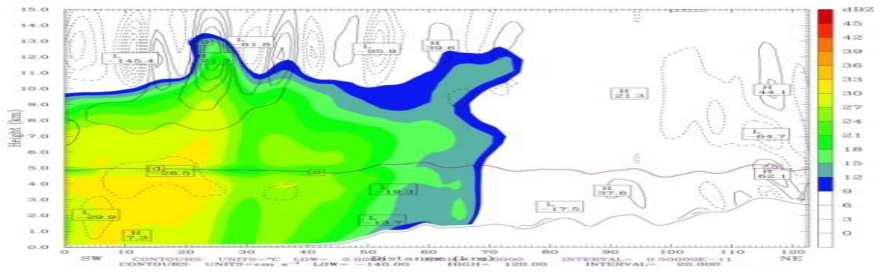


圖 5.32 NCAR/S-pol 雷達回波於 2008 年 6 月 2 日 0750 UTC 的 RHI (range-height indicator) 掃描觀測結果，方位角為 32° 。

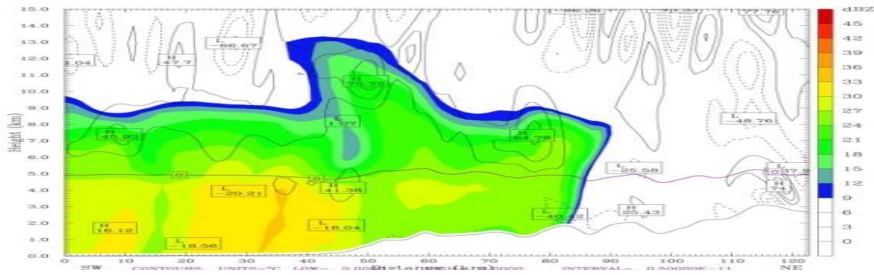
(a) MORI 2008/6/2 0200 UTC



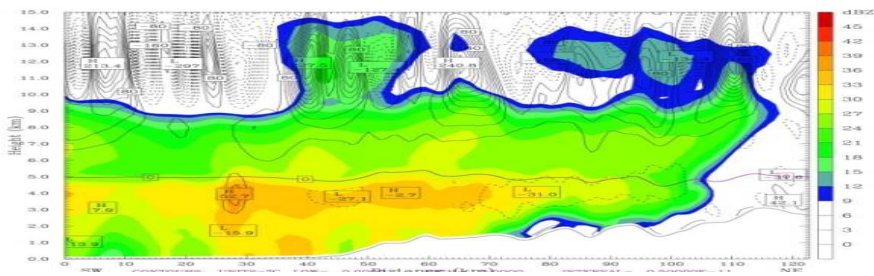
(b) THMN 2008/6/2 0200 UTC



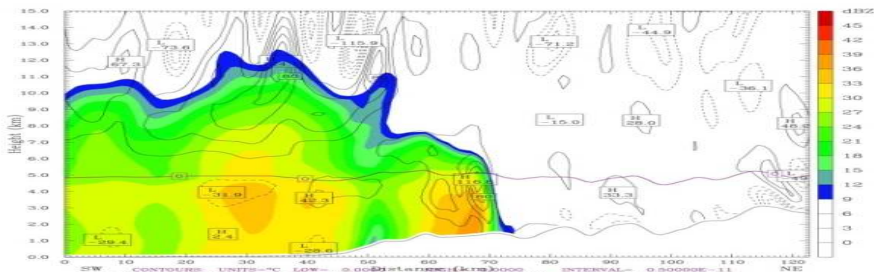
(c) WSM5 2008/6/2 0200 UTC



(d) WDM5 2008/6/2 0300 UTC



(e) WSM6 2008/6/2 0100 UTC



(f) WDM6 2008/6/2 0200 UTC

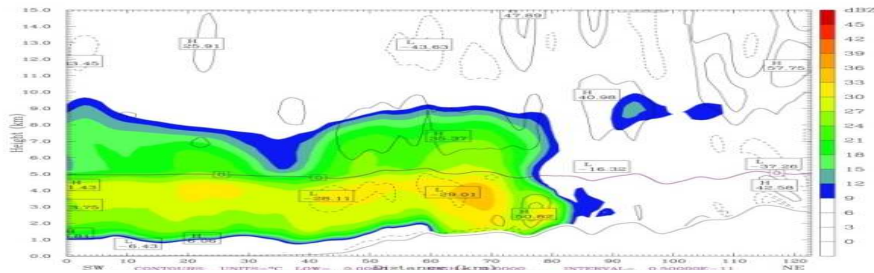


圖 5.33 第四層網域取圖 5.26 中 AB 連線的垂直剖面與左右各 8.35 公里，模擬的雷達回波和垂直速度側向平均值。色階為雷達回波，色階間隔為 3dBz；黑色實線表示垂直速度為正值，黑色虛線表示垂直速度為負值，等值線間距皆為 20cm/s。(a)是 MORI 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的模擬結果，(b)是 THMN 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC，(c)是 WSM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC，(d)是 WDM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0300UTC 的模擬結果，(e)是 WSM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC，(f)是 WDM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC。

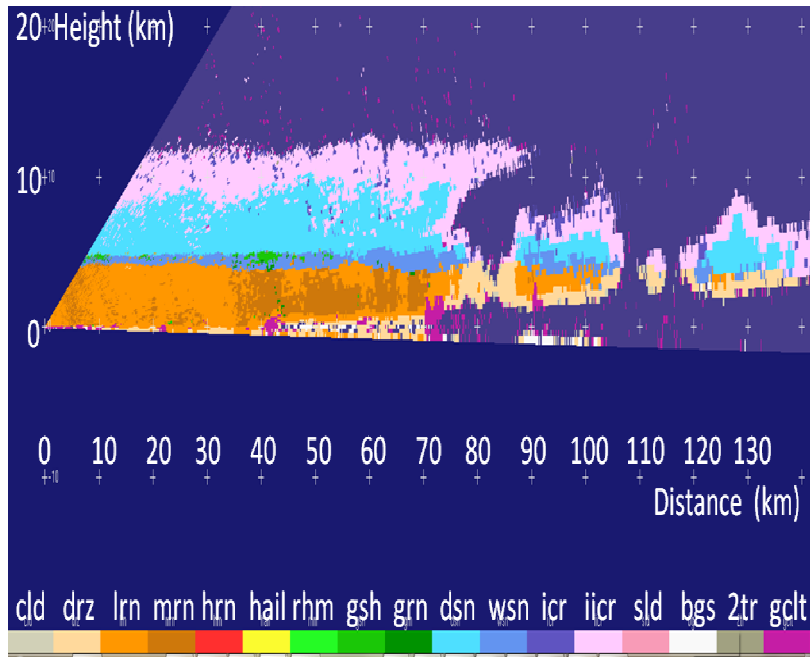
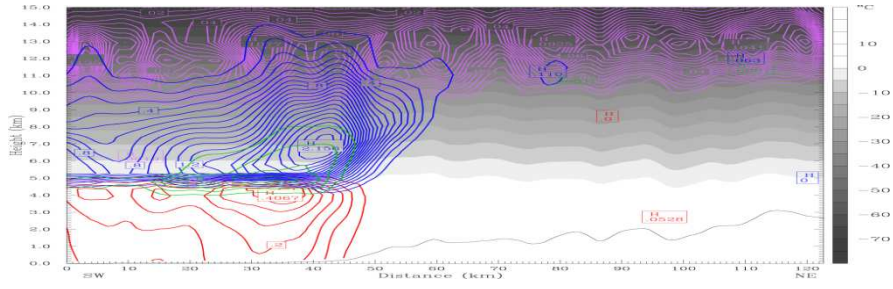
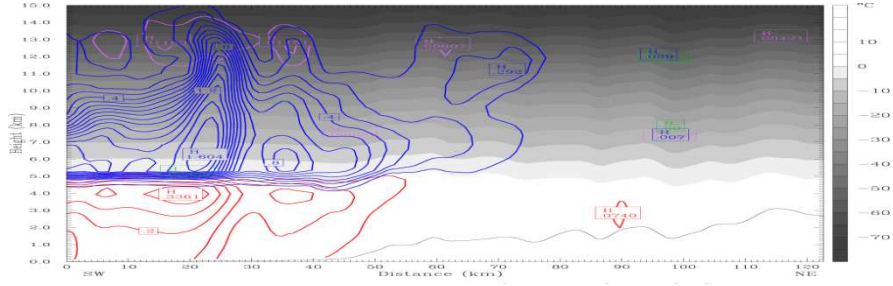


圖 5.34 是 NCAR/S-pol 雷達資料辨識的水相粒子分類圖。掃描時間為 2008 年 6 月 2 日 0750UTC 的 RHI (range-height indicator)，方位角為 32° 。色塊所代表的水相粒子分類說明同圖 5.30。

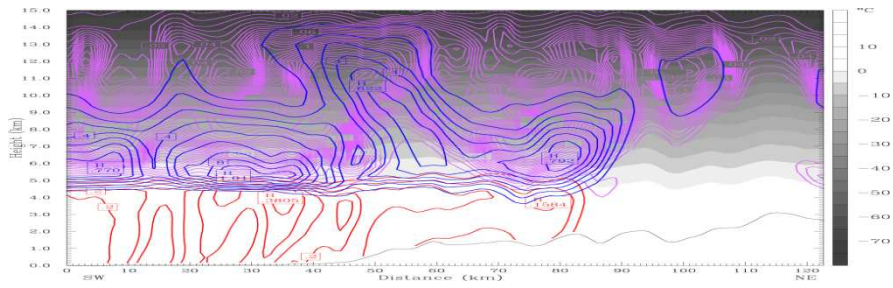
(a) MORI 2008/6/2 0200 UTC



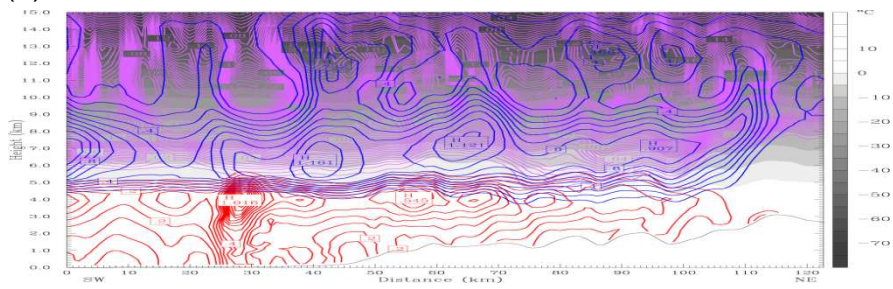
(b) THMN 2008/6/2 0200 UTC



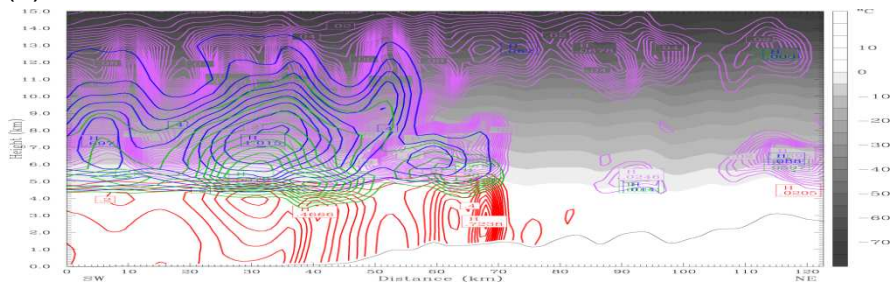
(c) WSM5 2008/6/2 0200 UTC



(d) WDM5 2008/6/2 0300 UTC



(e) WSM6 2008/6/2 0100 UTC



(f) WDM6 2008/6/2 0200 UTC

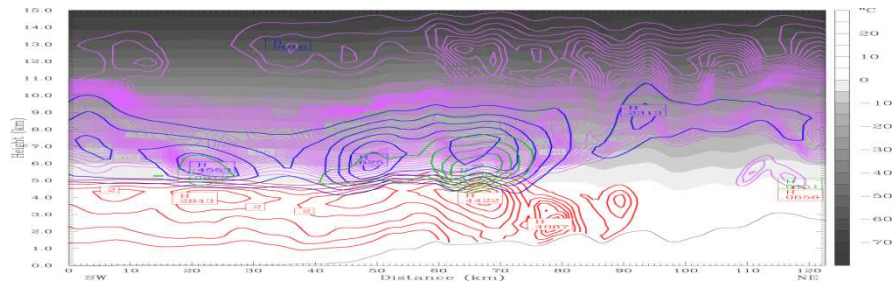
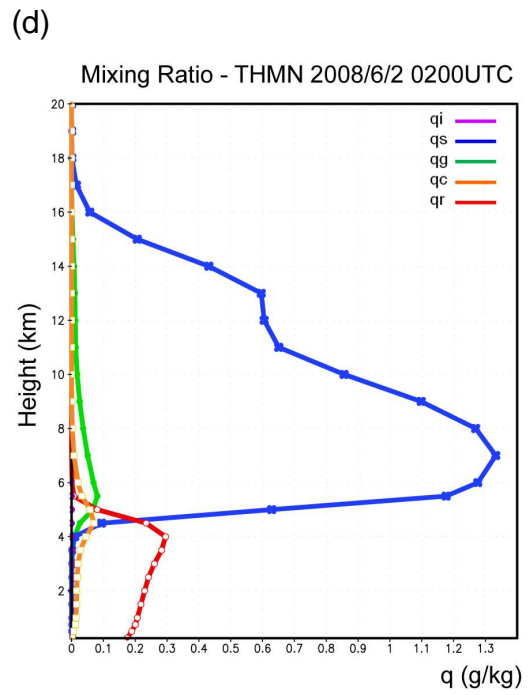
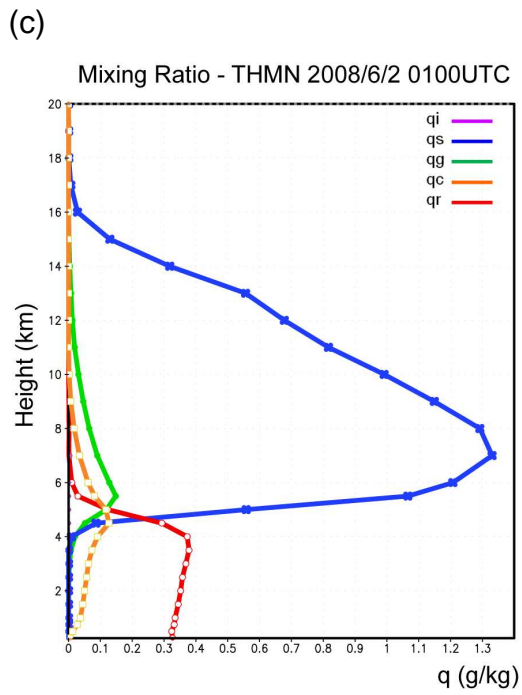
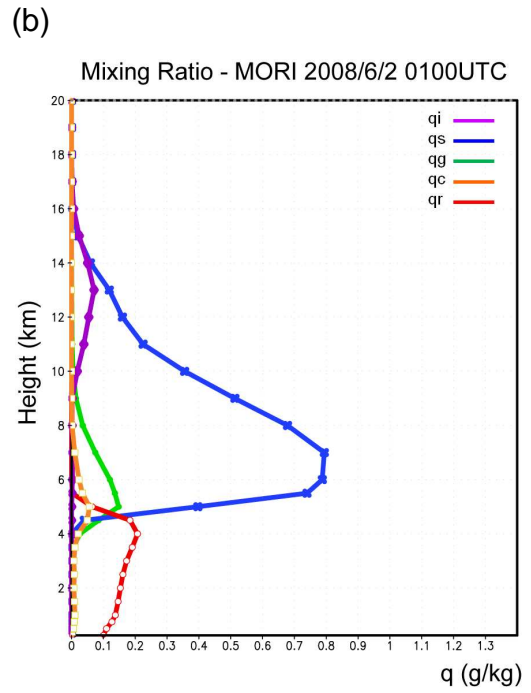
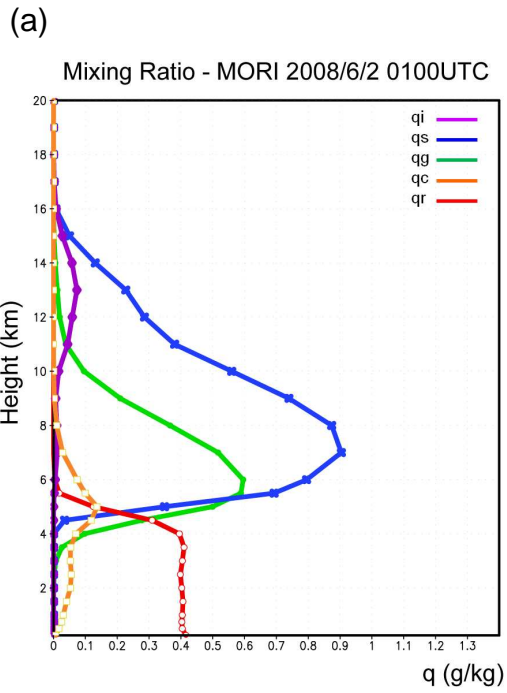
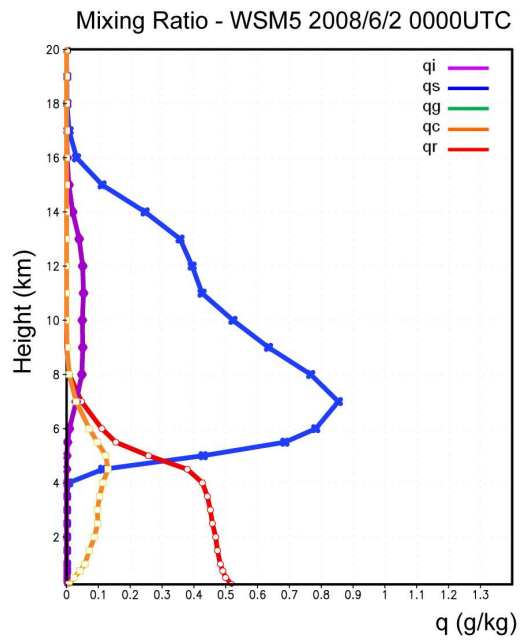


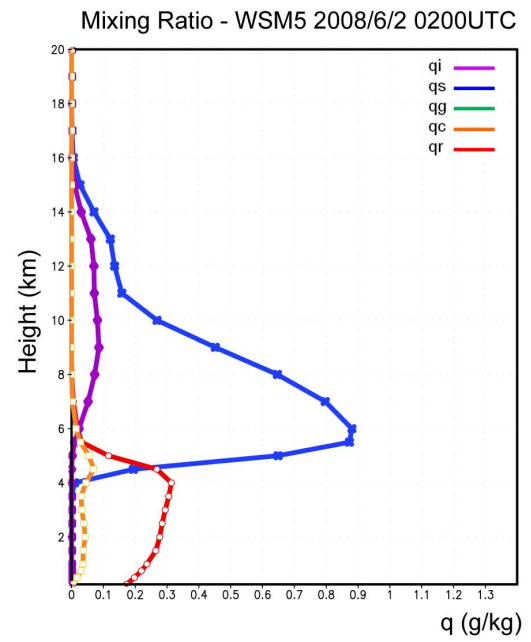
圖 5.35 第四層網域取圖 5.26 中 AB 連線的垂直剖面與左右各 8.35 公里，模擬的水相粒子質量混合比和融化層以上之溫度的側向平均值。紫色為雲冰混合比等值線，等值線間距為 0.005g/kg；藍色為雪混合比等值線，等值線間距為 0.1g/kg；綠色為軟雹混合比等值線，等值線間距為 0.1g/kg；紅色為雨水混合比等值線，等值線間距為 0.1g/kg。(a) (b) (c) (d) (e) (f)的說明同圖 5.33。



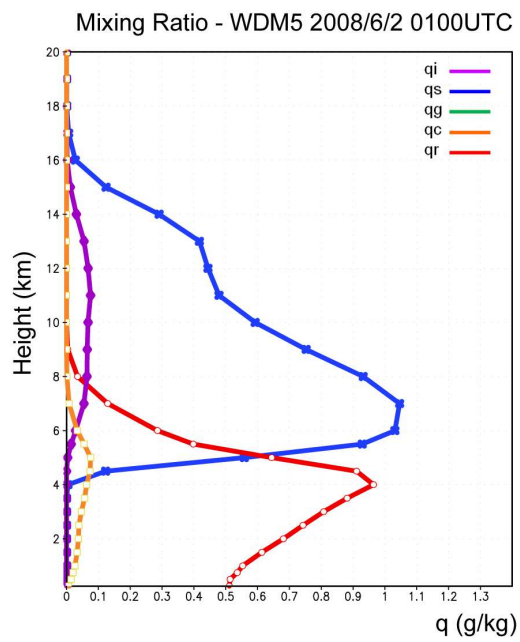
(e)



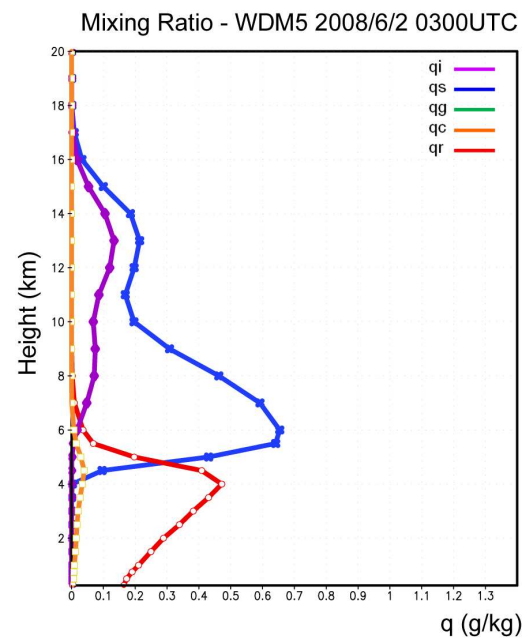
(f)



(g)



(h)



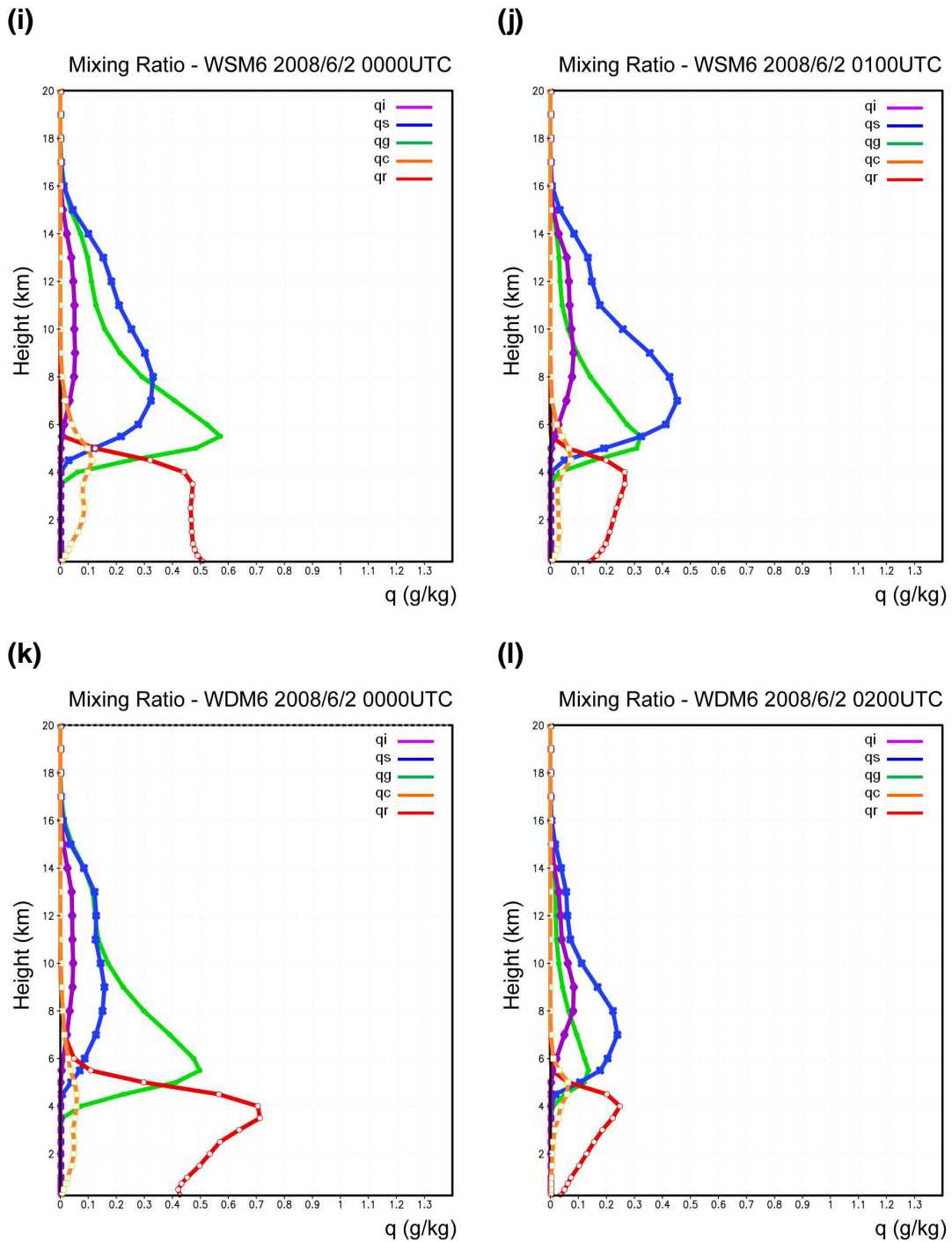
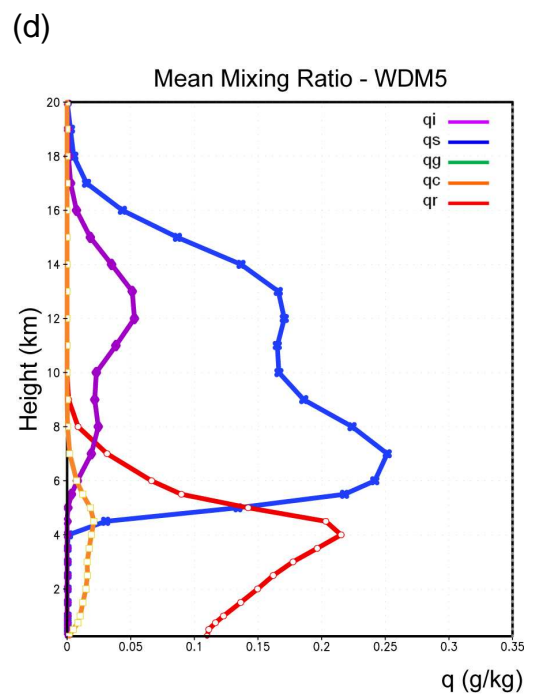
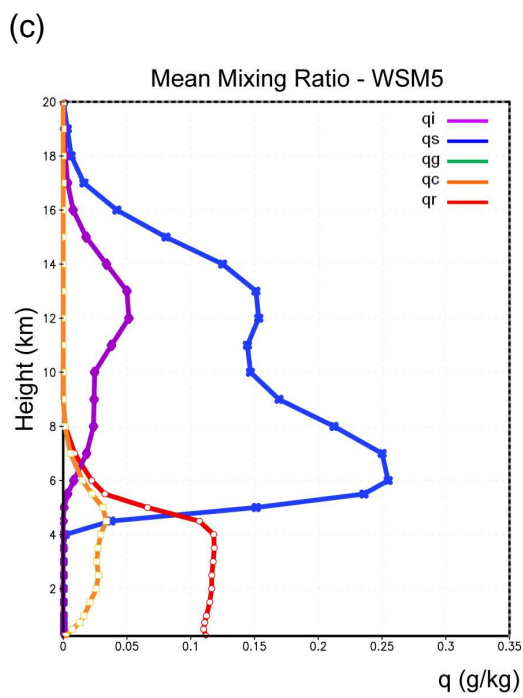
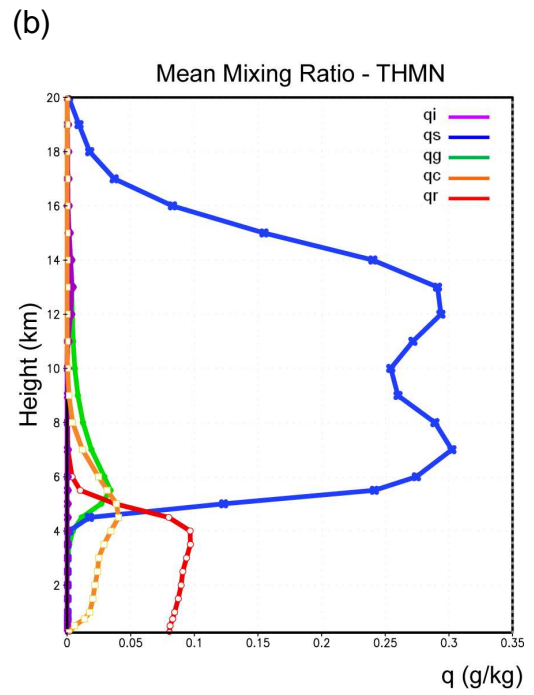
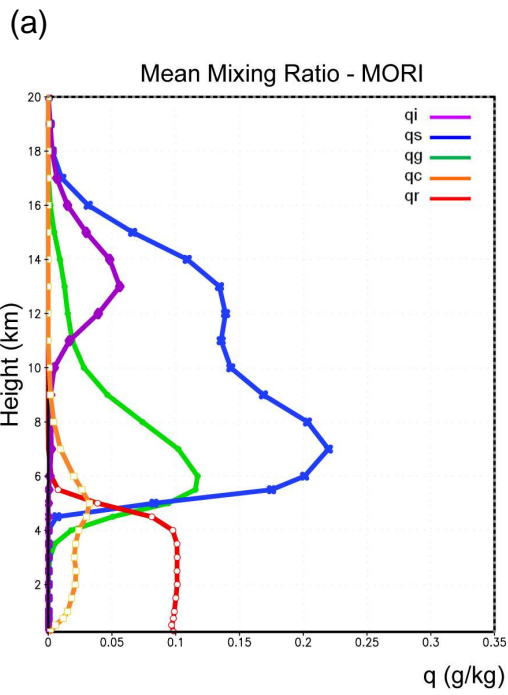


圖 5.36 為第一波降水系統的水相粒子混合比之空間側向平均值隨高度變化圖。空間平均取圖 5.26 綠色方框內的範圍。(a)是 MORI 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的結果，(b)是 MORI 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的結果；(c)是 THMN 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的結果，(d)是 THMN 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的結果；(e)是 WSM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC 的結果，(f)是 WSM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的結果；(g)是 WDM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的結果，(h)是 WDM5 實驗 2008 年 6 月 2 日 0300UTC 的結果；(i)是 WSM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC 的結果，(j)

是 WSM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0100UTC 的結果；(k)是 WDM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0000UTC 的結果，(l)是 WDM6 實驗 2008 年 6 月 2 日 0200UTC 的結果。紫線為雲冰混合比，藍線為雪混合比，綠線為軟雹混合比，橘線為雲水混合比，紅線為雨水混合比。



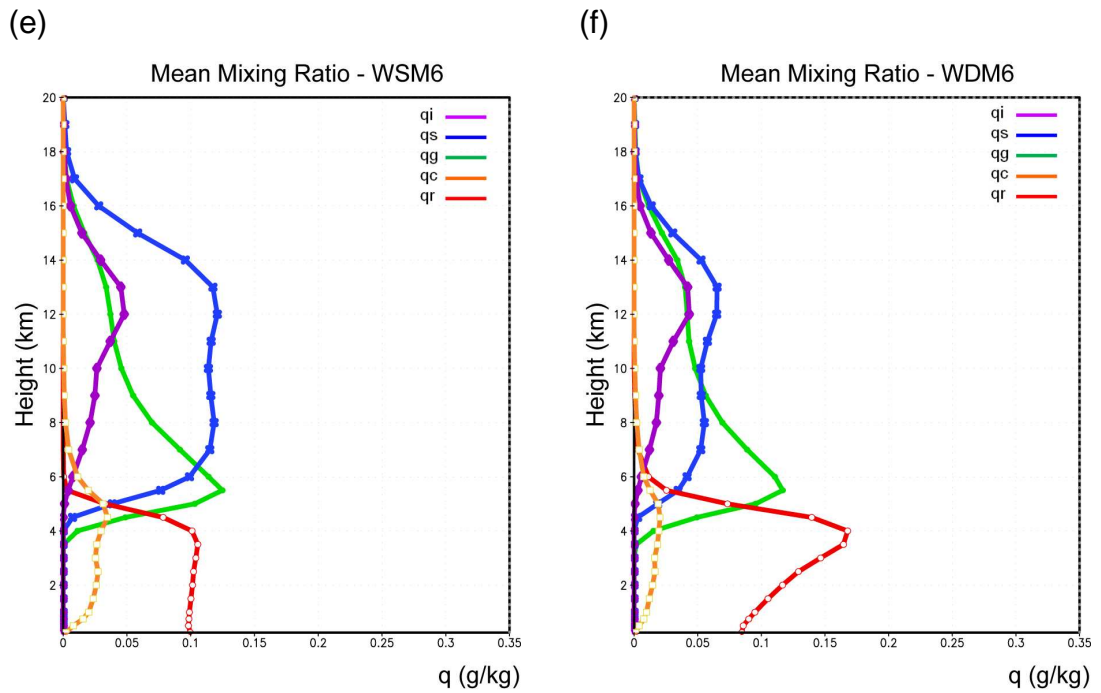


圖 5.37 為第一波降水系統的水相粒子混合比之時空平均值隨高度變化圖。時間平均範圍是 2008 年 6 月 1 日 1200UTC 至 2008 年 6 月 2 日 1200UTC 間的逐時資料之平均，空間平均取圖 5.26 綠色方框內的範圍。紫線為雲冰混合比，藍線為雪混合比，綠線為軟雹混合比，橘線為雲水混合比，紅線為雨水混合比。