

國立中央大學

大氣物理研究所

碩士論文

雲微物理參數化法及垂直解析度對降水模擬之影響：

以莫拉克(2009)颱風為例

研究生:林宜霖

指導教授:楊明仁 博士

中華民國 103 年 7 月



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(101 年 9 月最新修正版)

本授權書授權本人撰寫之碩/博士學位論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明)，在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」。(以下請擇一勾選)

同意 (立即開放)

同意 (請於西元 _____年____月____日開放)

不同意，原因是：_____

在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

同意 (立即開放)

同意 (請於西元 _____年____月____日開放)

不同意，原因是：_____

以非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統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、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：_____

學號：_____ 101621020 _____

論文名稱：雲微物理參數化法及垂直解析度對降水模擬之影響:以莫拉克(2009)颱風為例

指導教授姓名：楊明仁

系所：大氣物理 所 博士班 碩士班

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，應遵守著作權法規定。

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 研究所 林宜霖 研究生所提之論文

雲微物理參數化法及垂直解析度對降水模擬之影響：以莫拉克(2009)颱風為例

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 楊明仁 (簽章)

103 年 7 月 1 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 林宜霖 研究生所提
之論文

雲微物理參數化法及垂直解析度對降水模擬之影
響:以莫拉克(2009)颱風為例 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

陳正平

黃清勇

廖宇慶

楊明仁

中華民國 103 年 7 月 1 日

雲微物理參數化法及垂直解析度對降水模擬之影響：

以莫拉克(2009)颱風為例

摘要

本研究以2009年莫拉克颱風為例，藉由改變模式的雲微物理參數化法及垂直解析度，設計三組實驗以進行討論，分別包含：i) 單矩量(single-moment; WSM6_31)和雙矩量(double-moment; WDM6_31)參數化法比較，ii) 垂直分層 [21層(WDM6_21)、31層(WDM6_31)和45層(WDM6_mix45)]比較，和iii)四種雙矩量微物理參數化法(WDM6_31, Thompson_31, Morrison_31, Milbrandt and Yau_31)比較共七組模擬。研究目的著重於改進過去模式高估莫拉克颱風期間的山區累積降雨量，並且與觀測的雷達回波、颱風路徑與強度比較；另外也進行定量的降水校驗，比較模式24小時、6小時累積降雨的預報能力。

在實驗組i)中，WDM6_31實驗對莫拉克颱風的累積降雨極值、強度和登陸時間模擬，較WSM6_31實驗更接近觀測。降水校驗的結果以WSM6_31實驗的24小時累積降雨預報能力較WDM6_31實驗差。在實驗組ii)中，三組模擬陸上的平均降雨、颱風路徑和強度差異不大。降水校驗結果，不論是24小時或6小時累積降雨，WDM6_mix45實驗幾乎有最好的表現[預兆得分(TS)、公平預兆得分(ETS)最高；均方根誤差(RMSE)最小]。WDM6_mix45實驗由於垂直解析度較高，能避免同WDM6_21及WDM6_31實驗在模式頂層產生不合理的垂直速度和雷達回波分佈現象，另外透過垂直剖面分析也能看到，WDM6_mix45實驗的眼牆和眼有明顯崩塌；WDM6_21實驗因為中高層大氣的垂直解析度較差，於地形上容易產生不合理的垂直速度。整體而言，WDM6_mix45使得颱風的強度較為減弱，進而改善累積雨量的高估情形。在實驗組iii)中，後三組模擬能明顯改善WDM6_31實驗回波過強和降雨過高的偏差；降雨極值以Thompson_31和Milbrandt and Yau_31實驗兩組模擬改善最多。降水校驗的結果為，各組模擬的偏離係數(BS)在8月8日由低估轉成高估，並且8月8日以Milbrandt and Yau_31實驗各種得分表現最好。詳細討論各組模擬累積降雨情形，顯示研究使用的各降水校驗參數各有其缺失，甚至有時會誤導使用者對於模式降水預報能力的判斷，必須配合降雨分佈結果才能做較客觀的討論。從水相粒子之垂直分佈可知，WDM6方案產生較多的雨水，Thompson方案傾向產生較多的雪，Milbrandt and Yau方案則產生較多的冰晶，這些現象在台灣中央山脈地形的迎風面上更為顯著，主要是由於不同微物理參數法的原先設計環境條件而產生的系統性偏差。

The Impact on Precipitation Simulation by varying Microphysics Parameterization and Vertical Resolution : The Case of Typhoon Morakot (2009)

Abstract

An explicit simulation of Typhoon Morakot(2009) was studied. Three groups of numerical experiments were designed by varying microphysics parameterization schemes and vertical resolution, which were i) single-moment(WSM6_31) and double-moment(WDM6_31) schemes, ii) different vertical resolution(WDM6_21, WDM6_31, WDM6_mix45) and iii)different double-moment schemes(WDM6_31, Thompson_31, Morrison_31, Milbrandt and Yau_31). The study focused on the effects on the accumulated precipitation over mountainous areas, which was usually overestimated by model simulation. In addition to the comparison of radar reflectivity, typhoon tracks and intensity, precipitation maximum and patterns, a series of quantitatively statistics scores were evaluated between the observation data and model output.

In experiment i), WDM6_31 revealed a better performance on typhoon intensity and landfall time than WSM6_31. Besides, WDM6_31 also had better TSs and ETSs in 24-hour accumulated precipitation. In experiment ii), varying the vertical resolution had a small effect on typhoon precipitation maximum, intensity and landfall time simulation. No matter for 24-hour or 6-hour accumulated precipitation, WDM6_mix45 had the best performance among three simulations. Because of the finer vertical resolution in mid-to-upper layers, WDM6_mix45 avoided the unreasonable vertical velocity and radar reflectivity in upper layers. At the same time, WDM6_mix45 revealed the break down process of typhoon eye, which reduced typhoon intensity efficiently then lowered the overestimation of precipitation maximum in other simulations.

In experiment iii), Thompson_31, Morrison_31, Milbrandt and Yau_31 runs improved the positive bias for WDM6_31 run on radar reflectivity and precipitation maximum. On August 8th, Milbrandt and Yau_31 run had the smallest BIAS-1 value. While applying the statistics scores, the users should pay attention to the deficiencies of the scores, which could mislead the ability of model's precipitation predictability. On the vertical crosssection over terrain, WDM6_31 tended to produce more raindrops, Thompson_31 tended to produce more snows, whereas Milbrandt and Yau_31 tended to produce more ice flakes. It was the difference of original designs for every schemes that made the difference of precipitation simulations.

致謝

碩士兩年的生活，轉眼就要畫下句點了，想起碩士班放榜的那天好像還是昨天的事。回顧這兩年的時光，從碩一修課，不停地趕作業報告，到現在我能完成畢業論文，真的要感謝很多人。首先要感謝我的家人，爸爸媽媽給我經濟支柱，讓我無後顧之憂地完成學業，加上兩個妹妹，雖然我們上了大學和碩士之後各自工作、學業都很忙，更少時間能一家人相聚在一起，但是我們還是常常互相打氣、支持，真的很感謝你們。

接著要感謝我的指導教授楊明仁老師。老師常叮嚀我們要有獨立思考的能力，平時就算公務繁忙也會很仔細地給予我們研究方向建議，還有老師對於研究嚴謹的態度也是我應該學習的，再次謝謝老師的指導。感謝口試委員陳正平老師、廖宇慶老師與黃清勇老師，指正我論文裡的缺失，不管是研究的方法、觀念還有用字必須謹慎都使我了解自己的不足，這一次口試讓我獲益良多，非常謝謝各位老師的指教。

再來要感謝碩士這兩年來所有教導過我的老師們，這段時間真的學到很多，老師們不僅學識淵博，為人也非常和藹可親，特別是這幾個學期我擔任助教的時候，每次找老師問問題，老師們都會很詳細地為我解答，當助教真的讓我學到不少。突然想到自己即將脫離學生身份了，我一定會很懷念這段當學生，在台下埋頭寫筆記、可以向老師們請教學習的日子，謝謝老師們。

當然也要感謝實驗室的大家，感謝黃小玲學姊教我分析的方法和寫程式的技巧，這些都是教科書上學不到的；感謝林柏旭學長教導我們如何使用 WRF 模式，另外在我之前研究遇到問題的時候，和陳登舜學長兩位都給我一些方法，也提點我可能出現問題的原因；感謝黃郁芬學姊和我們一同討論作業報告，從大學的時候就接受學姊很多的幫助；感謝陳寰學長、林昌鴻學長，當初一開始跑模擬問題層出不窮，學長們都有求必應，也常常帶給我們歡笑，真的謝謝你們；感謝張惠琪學姊常常幫助我們很多研究之外的事情，每次都麻煩學姊了。最重要的是要感謝和我一起度過這兩年時光的鍾宜娟和蘇奕歡同學，這兩年來不管是學業上或生活上真的受到你們很多的幫助，能有你們兩位夥伴，真的是我非常大的收穫，也覺得特別安心。最後也要感謝我的同學們、學長姊和學弟妹，感謝 Aling、曉君、大柯柯、薇薇、小那、姚姚、Boy、林琴、爸爸、浩彥、梓舜、184 等等……(因為人數眾多，我實在無法一個一個列出你們的名字)謝謝你們在碩士這兩年來的陪伴，跟大家一起吃飯、聊天，每次都很開心，也謝謝你們這群朋友，在我有問題或遇到困難的時候，總是可以找到人傾訴和詢問，謝謝有你們在。

兩年的日子真的要感謝很多人，不管是家人、朋友、老師、學長姊、學弟妹，我真心地覺得能認識你/您們是非常幸運的一件事，謝謝大家。

目錄

| | |
|----------------------|----------|
| 中文摘要 | i |
| 英文摘要 | ii |
| 致謝 | iii |
| 目錄 | iv |
| 圖表目錄 | vi |
| 第一章、緒論 | 1 |
| 1-1 研究動機 | 1 |
| 1-2 文獻回顧 | 2 |
| 1-3 論文結構 | 4 |
| 第二章、模式架構與實驗設計 | 5 |
| 2-1 WRF 數值模式簡介 | 5 |
| 2-2 實驗設計 | 6 |
| 第三章、方法介紹 | 9 |
| 3-1 微物理參數化法說明 | 9 |
| 3-1-1 WSM6 方案 | 11 |
| 3-1-2 WDM6 方案 | 11 |
| 3-1-3 Thompson 方案 | 12 |
| 3-1-4 Morrison 方案 | 13 |

| | |
|----------------------------|-----------|
| 3-1-5 Milbrandt and Yau 方案 | 13 |
| 3-2 降水校驗參數 | 14 |
| 3-2-1 預兆得分(TS) | 16 |
| 3-2-2 公平預兆得分(ETS) | 17 |
| 3-2-3 偏離係數(BS) | 17 |
| 3-2-4 均方根誤差(RMSE) | 18 |
| 第四章、模擬結果 | 19 |
| 4-1 實驗一:單矩量和雙矩量方案比較 | 19 |
| 4-2 實驗二:不同垂直解析度比較 | 23 |
| 4-3 實驗三:不同雙矩量方案比較 | 29 |
| 第五章、結論 | 35 |
| 參考文獻 | 37 |

表目錄

| | |
|--|----|
| 表 2.1: 研究使用的七組模擬與其設定。----- | 40 |
| 表 3.1: 不同雙矩量方案預報的水相粒子質量混合比和粒子濃度總個數比較。v 代表水汽，c 代表雲水，r 代表雨水，i 代表冰晶，s 代表雪花，g 代表軟雹，h 代表冰雹，CCN 則代表雲凝結核。----- | 40 |
| 表 4.1: 實驗一中 WSM6_31 與 WDM6_31 兩組實驗結果比較。「√」表示與觀測有較接近的值或者降水校驗參數有較佳表現，其餘無法定量比較或無觀測資料驗證的則以文字說明。----- | 41 |
| 表 4.2: 實驗二中 WDM6_21、WDM6_31 與 WDM6_mix45 三組實驗結果比較。「√」表示與觀測有較接近的值或者降水校驗參數有較佳表現，其餘無法定量比較或無觀測資料驗證的則以文字說明。----- | 41 |
| 表 4.3: 實驗三中 WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 與 Milbrandt and Yau_31(簡稱 MY_31)四組實驗結果比較。「√」表示與觀測有較接近的值或者降水校驗參數有較佳表現，其餘無法定量比較或無觀測資料驗證的則以文字說明。----- | 42 |
| 表 4.4: WSM6、WDM6、Thompson、Morrison 與 Milbrandt and Yau(簡稱 MY)方案中對冰相粒子的定義比較。[BD=Bulk Density(kg*m ⁻³), rmax=最大粒徑(μm), rmin= 最小粒徑(μm)] ----- | 42 |

圖目錄

- 圖 2.1: 巢狀網格設計。-----43
- 圖 2.2: 實驗二中三組模擬的垂直層 η 值分佈，紅色、藍色、綠色實線分別表示垂直 21、31 和 45 層的模擬，圖(a)水平軸為各組模擬的垂直層數，垂直軸表示三組模擬在垂直方向上的 η 分佈。圖(b)為三組模擬中各層 η 差異，水平軸表示垂直方向上的格點數，垂直軸表示 η 差異。-----44
- 圖 3.1: 即 Brandes et al.(2007)的 Fig.1。水平軸表示雪花粒子的直徑(mm)，垂直軸則表示雪花粒子的總體密度。藍色和黃色點表示觀測降雪事件中雪花粒子的粒徑分佈，圖中每一條線則表示前人研究中描述雪花的粒徑分佈函數，綠色實線為 Thompson 方案中雪花的降冪次分佈函數。-----45
- 圖 4.1: 觀測與實驗一之雷達最大回波圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)分別為觀測與 WSM6_31 實驗、WDM6_31 實驗模擬結果。圖(a)(c)(e)為 2009 年 8 月 7 日 12Z 時，圖(b)(d)(f)為 2009 年 8 月 8 日 00Z 時。水平軸標示的是距離(km)。-----46
- 圖 4.2: 觀測與實驗一之 24 小時累積降雨圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)分別為觀測與 WSM6_31 實驗、WDM6_31 實驗結果。圖(a)(c)(e)為 2009 年 8 月 7 日累積雨量圖，圖(b)(d)(f)為 2009 年 8 月 8 日累積雨量圖。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。-----48
- 圖 4.3: 觀測與實驗一之 2009 年 8 月 7 日至 8 月 9 日共 72 小時累積降雨圖。圖(a)為觀測值，圖(b)為 WSM6_31 實驗，圖(c)為 WDM6_31 實驗。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。-----49
- 圖 4.4: 觀測(黑色)與實驗一(藍色:WDM6_31、紅色:WSM6_31)模擬颱風路徑。圖上標示的時間為 UTC 時。-----50
- 圖 4.5: 觀測(黑色)與實驗一之(藍色:WDM6_31、紅色:WSM6_31)模擬颱風中心氣壓。虛線表示不同的登陸台灣時間。圖上標示的時間為 UTC 時。-----50
- 圖 4.6: 實驗一以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為日期，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BIAS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WSM6_31 實驗，藍色表示 WDM6_31 實驗。-----51

圖 4.7: 實驗一以 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.6。-----51

圖 4.8: 實驗一以 24 小時累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.6。-----52

圖 4.9: 實驗一以 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為時間，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BIAS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WSM6_31 實驗，藍色表示 WDM6_31 實驗。-----52

圖 4.10: 實驗一以 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.9。-----53

圖 4.11: 實驗一以 6 小時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖(a)-(d)說明同圖 4.9，圖(e)為 399 個觀測站與模擬每 6 小時平均累積降雨量時序圖。-----53

圖 4.12: 觀測與實驗一之 6 小時累積降雨圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)分別為觀測、WSM6_31 實驗和 WDM6_31 實驗。圖(a)(c)(e)為 2009 年 8 月 7 日 06 時，圖(b)(d)(f)為 2009 年 8 月 9 日 00 時。圖中黑色框框內數字為陸地上 6 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。-----54

圖 4.13: 觀測與實驗二模擬之雷達最大回波圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)分別為觀測、WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。圖(a)(c)(e)(g)為 2009 年 8 月 8 日 00Z 時，圖(b)(d)(f)(h)為 2009 年 8 月 8 日 12Z 時。水平軸標示的是距離(km)。-----55

圖 4.14: 觀測與實驗二之 24 小時累積降雨圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)分別為觀測、WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。圖(a)(c)(e)(g)為 2009 年 8 月 7 日累積雨量圖，圖(b)(d)(f)(h)為 2009 年 8 月 8 日累積雨量圖。圖中黑色框框為陸地上 24 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。----58

圖 4.15: 觀測與實驗二之 2009 年 8 月 7 日至 8 月 9 日共 72 小時累積降雨圖。圖(a)為觀測值，圖(b)為 WDM6_21 實驗，圖(c)為 WDM6_31 實驗，圖(d)為 WDM6_mix45 實驗。圖中左上角黑色框框為陸地上 24 小時平均累積雨量，圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。-----60

圖 4.16: 實驗二以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為日期,自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BIAS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WDM6_21 實驗,藍色表示 WDM6_31 實驗,綠色表示 WDM6_mix45 實驗。-----61

圖 4.17: 實驗二以 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.16。-----61

圖 4.18: 實驗二以 24 小時累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.16。-----62

圖 4.19: 實驗二以 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為時間,自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BIAS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WDM6_21 實驗,藍色表示 WDM6_31 實驗,綠色表示 WDM6_mix45 實驗。-----62

圖 4.20: 實驗二以 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.19。-----63

圖 4.21: 實驗二以 6 小時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖(a)-(d)說明同圖 4.19,圖(e)為 399 個觀測站與模擬每 6 小時平均累積降雨量時序圖。-----63

圖 4.22: 觀測與實驗二之 6 小時累積降雨圖,圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)分別為觀測、WDM6_21 實驗、WDM6_31 實驗和 WDM6_mix45 實驗。圖(a)(c)(e)(g)為 2009 年 8 月 8 日 06 時,圖(b)(d)(f)(h)為 2009 年 8 月 8 日 12 時。圖中黑色框框內數字為陸地上 6 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。--64

圖 4.23: 實驗二 2009 年 8 月 8 日 06Z 之雷達最大回波圖,圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21 實驗、WDM6_31 實驗與 WDM6_mix45 實驗結果。水平軸標示的是距離(km)。-----66

圖 4.24: 觀測(黑色)與實驗二之(紅色:WDM6_21、藍色:WDM6_31、綠色:WDM6_mix45)模擬颱風路徑圖。圖上標示的時間為 UTC 時。-----67

圖 4.25: 觀測(黑色)與實驗二之(紅色:WDM6_21、藍色:WDM6_31、綠色:

WDM6_mix45)模擬颱風中心氣壓圖。虛線表示不同實驗的登陸台灣時間。圖上標示的時間為 UTC 時。-----67

圖 4.26: 8 月 7 日 21Z(颱風登陸前)選取垂直剖面，圖上數字表示剖面的水平長度和寬度。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。水平軸標示的是距離(km)。-----68

圖 4.27: 為圖 4.26 方框中西北-東南走向之垂直剖面圖。陰影區表示相當位溫(K)，綠色實線表示雷達回波 20dBZ 等值線。圖上標示為颱風海平面中心位置。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。-----69

圖 4.28: 為圖 4.26 方框中西北-東南走向之垂直剖面。陰影區表示雷達回波(dBZ)，實線表示正垂直速度(間距:100cm/s)，虛線表示負垂直速度(間距:50 cm/s)。圖上標示為颱風海平面中心位置。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。-----70

圖 4.29、8 月 8 日 01z(颱風在台灣地形上)選取剖面，圖上數字表示垂剖面的水平長度和寬度。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。水平軸標示的是距離(km)。-----72

圖 4.30: 為圖 4.29 方框中西北-東南走向之垂直剖面圖。陰影區表示相當位溫(K)，綠色實線表示雷達回波 20dBZ 等值線。圖上標示為颱風海平面中心位置。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。-----73

圖 4.31: 8 月 8 日 12Z(颱風離開陸地)選取剖面，圖上數字表示垂直剖面的水平長度和寬度。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。水平軸標示的是距離(km)。-----75

圖 4.32: 為圖 4.31 東-西向垂直剖面。陰影區表示雷達回波(dBZ)圖，實線表示正垂直速度(間距:100 cm/s)，虛線表示負垂直速度(間距:100 cm/s)。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。-----76

圖 4.33: wave aliasing 示意圖，黑色線為原始訊號，紅色線為 wave aliasing 時誤判的訊號。-----77

圖 4.34: 8 月 8 日 15Z(颱風離開陸地)選取剖面，圖上數字表示垂直剖面的水平長度和寬度。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。水平軸標示的是距離(km)。-----78

圖 4.35: 為圖 4.34 東-西向垂直剖面。陰影區表示雷達回波(dBZ)圖，實線表示正垂直速度(間距:100 cm/s)，虛線表示負垂直速度(間距:100 cm/s)。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。-----79

圖 4.36: 觀測與實驗三之雷達最大回波圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)、圖(i)(j)分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗。圖(a)(c)(e)(g)(i)為 2009 年 8 月 7 日 12Z 時，圖(b)(d)(f)(h)(j)為 2009 年 8 月 8 日 12Z 時。水平軸標示的是距離(km)。-----80

圖 4.37: 觀測與實驗三 24 小時累積降雨，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)、圖(i)(j)分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗。圖(a)(c)(e)(g)(i)為 2009 年 8 月 7 日累積雨量圖，圖(b)(d)(f)(h)(j)為 2009 年 8 月 8 日累積雨量圖。圖中黑色框框內數字為陸地上 24 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。-----83

圖 4.38: 觀測與實驗三 2009 年 8 月 7 日至 8 月 9 日共 72 小時累積降雨量圖。圖(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗。圖中左上角黑色框框內數字為陸地上 72 小時平均累積雨量，圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。-----85

圖 4.39: 實驗三以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果圖。水平軸為日期，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BIAS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中藍色表示 WDM6_31 實驗，紅色表示 Thompson_31 實驗，綠色表示 Morrison_31 實驗，紫色表示 Milbrandt and Yau_31 實驗。-----87

圖 4.40: 實驗三以 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.39。-----87

圖 4.41: 實驗三以 24 小時累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.39。-----88

圖 4.42: 實驗三以 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為時間，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BIAS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中藍色表示 WDM6_31 實驗，紅色表示 Thompson_31 實驗，綠色表示 Morrison_31 實驗，紫色表示 Milbrandt and Yau_31 實驗。-----89

圖 4.43: 實驗三以 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.42。-----89

圖 4.44: 實驗三以 6 小時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖(a)-(d)說明同圖 4.42，圖(e)為 399 個觀測測站與模擬每 6 小時平均累積降雨量時序圖。-----90

圖 4.45: 觀測與實驗三之 6 小時累積降雨圖，圖(a)(b)(c)、圖(d)(e)(f)、圖(g)(h)(i)、圖(j)(k)(l)、圖(m)(n)(o)分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗。圖(a)(d)(g)(j)(m)為 2009 年 8 月 7 日 06Z 時，圖(b)(e)(h)(k)(n)為 2009 年 8 月 8 日 06Z 時，圖(c)(f)(i)(l)(o)為 2009 年 8 月 9 日 00Z 時。圖中黑色框框內數字為陸地上 6 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。-----91

圖 4.46: 觀測(黑色)與實驗三(藍色:WDM6_31、綠色:Morrison_31、紫色:Milbrandt and Yau_31、紅色:Thompson_31)模擬颱風路徑。圖上標示的時間為 UTC 時。水平軸標示的是距離(km)。-----95

圖 4.47: 觀測(黑色)與實驗三(藍色:WDM6_31、綠色:Morrison_31、紫色:Milbrandt and Yau_31、紅色:Thompson_31)模擬颱風強度，虛線表示登陸台灣時間。圖上標示的時間為 UTC 時。-----95

圖 4.48: 實驗三之雷達最大回波圖，圖(a)為 WDM6_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 09Z)，圖(b)為 Thompson_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 14Z)，圖(c)為 Morrison_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 07Z)，圖(d)為 Milbrandt-Yau_31 實驗結果(2009 年 8 月 8 日 13Z)。為颱風在台灣西南部地形迎風面造成強降雨之時。水平軸標示的是距離(km)。--96

圖 4.49: 圖 4.48 垂直剖面。陰影區表示相當位溫(K)，綠色實線表示雷達回波 20dBZ 等值線。圖(a)為 WDM6_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 09Z)，圖(b)為 Thompson_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 14Z)，圖(c)為 Morrison_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 07Z)，圖(d)為 Milbrandt-Yau_31 實驗結果(2009 年 8 月 8 日 13Z)。-----97

圖 4.50: 圖 4.48 垂直剖面。陰影區表示雷達回波(dBZ)，實線表示正垂直速度(間距:40 cm/s)，虛線表示負垂直速度(間距:40 cm/s)。圖(a)為 WDM6_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 09Z)，圖(b)為 Thompson_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 14Z)，圖(c)為 Morrison_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 07Z)，圖(d)為 Milbrandt-Yau_31 實驗結果(2009 年 8 月 8 日 13Z)。圖(e)為觀測之雷達回波，為 2010 年莫拉克颱風科學報告，莫

圖 4.51: 圖 4.48 垂直剖面圖。黑色實線表示攝氏 0 度溫度線，紫色實線表示雲冰混合比(間距:0.1g/kg)，紅色實線表示雨水混合比(間距:0.3g/kg)，橘色實線表示雲水混合比(間距:0.2g/kg)，藍色實線表示雪混合比(間距:0.2g/kg)，綠色實線表示軟雹混合比(間距:0.3g/kg)。圖(a)為 WDM6_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 09Z)，圖(b)為 Thompson_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 14Z)，圖(c)為 Morrison_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 07Z)，圖(d)為 Milbrandt-Yau_31(2009 年 8 月 8 日 13Z) 實驗結果。-----102

第一章、緒論

1-1 研究動機

Huang, Yang and Sui(2014)討論莫拉克颱風(2009)在台灣地形上的水收支(Water Budget)和降水效率(Precipitation Efficiency)，使用 WSM6 微物理參數化方案進行 WRF 模式模擬，計算台灣陸地上 24 小時及 72 小時累積降雨量，並與實際觀測進行比較。由觀測雨量資料可知，在莫拉克颱風影響台灣期間(2009 年 8 月 7 日至 8 月 9 日)，為中央山脈南段帶來最大降雨，72 小時的累積降雨極值高達 2683 毫米。WRF 模式模擬的結果，雖然累積降雨極值地理位置與實際觀測相近，但是 72 小時的累積降雨極值卻嚴重高估(3392 毫米)!另外 WRF 模式對較強降雨區(2400 毫米以上)的模擬範圍比起觀測更廣，使得降雨量的模擬與觀測有很大的誤差。Huang, Yang and Sui(2014) 的文章中指出，這可能是由於中央山脈上雨量測站的不足(實際上有如模擬這個高的降雨量但沒有測站觀測)、模式計算累積的誤差、或者是使用單矩量微物理參數化法(WSM6)的偏差所致。

雙矩量微物理參數化方案因為模式預報了水相粒子的質量混合比和降水粒子濃度(個數)，比起僅預報質量混合比的單矩量微物理參數化方案而言，理論上會更接近真實情況。不過 WRF 模式中有數種雙矩量微物理參數化方案可供選擇，每一種微物理參數化方案都針對不同的降水環境條件所設計，因此這些雙矩量微物理參數化方案並不一定適合用在台灣的降水環境模擬。

隨著電腦運算速度的提升，許多雲解析模式在進行模擬時可以提高水平的解析度至1公里或更細，使得模式可以解析小尺度的物理現象。不過，並不是提高水平解析度就會得到較好的結果。原因可能在於垂直解析度的差異同樣會影響模擬的結果。在垂直方向上除了一般所知的 CFL instability condition 計算不穩定條件外，Lindzen and Fox-Rabinovitz(1989) 透過準地轉

流(quasi-geostrophic flows)和重力波的角度分析，分別推導出垂直解析度和水平解析度的相互關係。當垂直解析度和水平解析度的搭配不符合該方程時，數值模式對於真實大氣中特定物理現象的解析能力就可能受到影響。

此外，提高模式在特定高度層的垂直解析度，有助於模式模擬該高度層環境對於對流系統發展的影響。例如颱風主要受到對流的潛熱釋放得以生成並加強，受到地形和低層邊界層摩擦的影響而減弱，所以適當地提高低層大氣的垂直解析度，理論上能使模式較合理地模擬出低層大氣的能量傳遞，得到較接近實際觀測的結果。提高中高層的垂直解析度，則可以解析颱風眼牆在垂直方向上的能量和重力波傳遞，進一步影響颱風的強度和降雨模擬。

因此，本篇研究希望透過雲微物理參數化法比較及垂直解析度之調整，嘗試改善過去模式高估台灣地形上累積降雨的現象，吾人選擇地形降雨明顯的莫拉克(2009)颱風個案為例。研究包含三組實驗:i)單矩量(WSM6)與雙矩量(WDM6)微物理參數化方案之比較，ii)垂直解析度不同(21層、31層、和45層)之比較，以及iii)四種雙矩量微物理參數化方案(WDM6、Thompson、Morrison、和Milbrandt and Yau)之比較等。

1-2 文獻回顧

台灣位在熱帶氣旋生成頻繁的西北太平洋區域，每年平均降雨量2500毫米以上，其中登陸颱風的貢獻為最多，颱風登陸之後受台灣地形阻擋影響，因此颱風降雨和台灣地形之間存在一「鎖相(phase lock)」關係，為台灣帶來豐沛的雨量(Chang 1982)。因此提高數值模式對於颱風降雨量預報的準確度，對台灣來說是很重要的任務。不過由於海上觀測資料缺乏，加上目前對於颱風與中央山脈的交互作用仍然不清楚，使得預報台灣附近的颱風仍然是一項挑戰(Wu and Kuo 1999)。

數值模式中直接影響降雨的兩大參數化法為積雲參數化法和微物理參數化法。隨著電腦運算速度的演進，數值模式的水平解析度提高，很多模式模擬已不使用積雲參數化法，因此微物理參數化法便是影響降雨模擬的主要原因。現今模式中微物理參數化法多屬總體水物法(bulk method)，將水相粒子的粒徑分佈以一個數學函數的形式描述，這種方法比起粒徑網格點方法(bin-resolving method)可以更為減省計算時間，因此在實務預報上多使用總體水物法。

總體水物法又將微物理參數法分為單矩量、雙矩量和三矩量三種方案(單矩量和雙矩量在運算上的差異於3.1節詳細說明)。簡單來說，單矩量方案僅預報水相粒子的質量混合比，雙矩量方案則是多加上粒子濃度個數的預報，使得水相粒子的粒子濃度可以隨時間直接變化，理論上會更加接近真實觀測結果。

很多研究比較了單矩量和雙矩量兩種微物理參數方案，同時也提出雙矩量方案仍然存在許多問題。Lee and Leo(2011)分別使用雙矩量與單矩量方案，對四個真實的雲系統進行模擬，結果雙矩量方案得到的降雨量比起單矩量方案更接近觀測。Morrison et al. (2005)使用Morrison雙矩量參數化法和兩個單矩量微物理方案(Reisner et al. 1998)，針對1998年5月4日至5日一位在極區混合相位的對流系統進行模擬，該系統向水平方向延伸，由於綜觀環境沒有強作用力，因此系統在極區存在兩天的時間，配合當時的Surface Heat Budget of the Arctic Ocean (SHEBA)/First International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) Regional Experiment–Arctic Clouds Experiment (FIRE–ACE)，有密集的衛星觀測資料。此研究將模擬的結果與衛星反演的雲分佈、地面氣壓、水氣通量、大氣長短波輻射和位溫的垂直剖面進行比較，研究結果表示Morrison方案比起單矩量方案更接近觀測，表示Morrison方案對於極區附近雲對流的模擬更佳。

雙矩量方案雖然理論上能得到較合理的粒徑分佈，不過由於比起單矩量多預報一個預報變數，增加了一個自由度，因此不同的雙矩量方案之間的差異會比起不同單矩量方案來的大(Milbrandt and Yau 2006; Morrison et al. 2009; Dawson et al. 2010)。

使用不同的垂直解析度(垂直方向從 23 到 69 層)模擬颶風 Andrew(1992)，研究發現模式的垂直解析度越高，颶風的強度越強(Chang 和 Wang 2003)。若是以理想的渦旋進行討論，發現模式的垂直解析度由 21 層提高到 43 層，傾向得到較強的颶風，不過將垂直解析度繼續從 43 層提高到 64 層，反而得到較弱的颶風強度。另外，增加低層大氣的垂直解析度也能得到較強的颶風，提高高層大氣的解析度則得到較弱的颶風，顯示垂直解析度和颶風強度間並不是簡單的線性關係(Chang et al. 2014)。

1-3 論文結構

第二章為 WRF 模式簡介和本研究中三組實驗設計介紹；第三章為方法介紹，第一部分是研究中使用的五種微物理參數化方案，第二部分則是研究用在降水校驗的四個評分指數；第四章則會依據各個實驗逐一進行模擬結果的比較，包括雷達回波、颱風路徑、颱風強度、24 小時累積降雨及 72 小時累積降雨等等，另外也針對各組實驗做剖面分析颱風垂直方向上的相當位溫、垂直風速場和水相粒子分佈等作探討；第五章為本篇研究的總結。

第二章、模式架構與實驗設計

2-1 WRF 數值模式簡介

WRF(Weather Research and Forecasting)模式為新一代的中尺度數值天氣預報系統，自2000年代起，由NCAR (the National Center for Atmospheric Research)、NCEP (the National Centers for Environmental Prediction)、FSL (the Forecast System Laboratory)、the Naval Research Laboratory、the University of Oklahoma、AFWA(the Air Force Weather Agency)、FAA(the Federal Aviation Administration)等單位所共同研發。WRF為一非靜力平衡之動力模式，可用於大氣研究與實務預報上。該模式的兩大核心特色在於提供資料同化系統和運算平行化以提高運算效率，同時可以對數公尺至數千公里的大氣尺度現象進行模擬。本篇研究使用的是WRF 3.4版本(2012年4月6日發表)。此外，WRF可應用於真實天氣個案模擬，或是應用於理想化實驗模擬。

經過每個研究及作業單位長時間的努力和改進，WRF模式不斷更新，提供許多物理參數化方案、數值方法和資料同化方法等供使用者依照所模擬的天氣系統尺度和地區特性做適當選擇。物理參數化包含降水物理(積雲參數化方案和微物理參數化方案)過程、大氣輻射過程(大氣長波、短波輻射參數化方案)、大氣邊界層過程、地表邊界層過程等。

WRF模式中之垂直座標為 $\eta(\eta)$ 座標，即靜力氣壓(質量)座標，相當於MM5的 σ 座標， η 的定義如(2.1)式所示。(2.1)式中， P_{ht} 和 P_{hs} 分別表示模式頂層和底層大氣壓力， P_h 則表示滿足靜力平衡條件下，某層大氣的壓力。WRF模式中，網格設定採用Arakawa C grid，主要特色為各個速度變數放在熱力變數前後左右上下二分之一網格之處，屬交錯網格的一種。在時間積分方面，WRF模式則是使用3階的Runge-Kutta 數值方法。

$$\eta = \frac{(P_h - P_{ht})}{(P_{hs} - P_{ht})} \quad (2.1)$$

2-2 實驗設計

本篇研究模擬時間為 2009 年 8 月 6 日 0000 LST 至 2009 年 8 月 10 日 0000 LST，共計 96 小時。使用 3 層之 two-way 巢狀網域(網域設置如圖 2.1)，三層網格水平解析度由外至內分別為 9 公里、3 公里及 1 公里。第一層網格包含颱風生成的西北太平洋；第二層為莫拉克颱風從海上接近台灣，到登陸台灣後又遠離台灣，對台灣造成影響期間路徑經過的範圍，以利颱風路徑之分析；第三層則是涵蓋台灣全島和離島區域，本篇研究中降雨的校驗即是使用第三層網格的 WRF 模式模擬結果。

模式的初始化為 ECMWF $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ 資料，模式頂層皆為 30 百帕。

各種物理參數化方法與 Huang, Yang and Sui(2014) 的研究相同，長波輻射參數化法選用 RRTM 方案(Mlawer et al., 1997)，短波輻射參數化法選用 Dudhia 方案(Dudhia, 1989)，邊界層參數化法選用 YSU scheme (Hong and Pan, 1996)，三層網格皆不使用積雲參數化，假設網格系統可以直接解析對流胞，故不用積雲參數法。

微物理參數化則是依據各個實驗選用不同的參數化方案，包含一種單矩量微物理參數化方案(WSM6)，以及四種雙矩量微物理參數化方案(WDM6、Thompson、Morrison 和 Milbrandt and Yau)，研究中採用的五種微物理參數化方案將於 3-1 節詳細介紹。研究中 WSM6_31 模擬為 Huang, Yang and Sui(2014) 的模式輸出結果。

本研究共包含七組模擬如表 2.1，模擬的命名是以該模擬選用的雲微物理參數化法為首，底線後則是該模擬的垂直層數，例如 WSM6_31 即表示選用 WSM6 單矩量微物理參數化方案，並且在垂直層上為 31 層的模擬。為了便於討論，本篇研究將七組模擬分為三組實驗進行討論。

第一組實驗為單矩量(WSM6_31)與雙矩量(WDM6_31)的比較，兩組模擬垂直層皆為 31 層。第二組實驗為垂直解析度的比較，包含 WDM6_21、

WDM6_31 和 WDM6_mix45 共三組模擬，本實驗中將垂直層數定為操縱變因，因此微物理參數化皆採用 WDM6，詳細的垂直層分佈如圖 2.2。

圖 2.2a 表示垂直層的 eta 值設定，計算各層 eta 值差異可以得到圖 2.2(b)。從圖 2.2(b)中可以看到，三組模擬在底層解析度類似，越接近底層解析度越高。WDM6_21 和 WDM6_31 為一般模擬大氣密度的分佈，設計垂直解析度自底到頂，由密到疏。WDM6_mix45 則是在高層提高解析度，形成底層頂層都加密的結構。

吾人曾嘗試提高模式的垂直解析度至 55 層，當颱風登陸之後，不論使用研究中何種雙矩量微物理參數方法，模式會無法繼續運作，即便持續降低時間間隔(dt)至 6 秒，以使其滿足垂直方向上的 CFL instability condition，模式仍然無法繼續運作。此外在測試的過程中也發現，垂直層解析度的設計在海洋上較沒有明顯限制，不過要使模式在台灣地形上仍然可以運作，主要的條件應該是地形上底層 η 的設定。不論是 21 層、31 層或 45 層的垂直解析度，經過多次嘗試的結果，發現以本研究的設定必須保持「 η 值介於 1 到 0.7 之間，模式允許的最高垂直層數為 15 層」這項條件，推測可能是因為在颱風登陸之後，受到複雜地形的影響，在強降雨的過程中，粒子的終端落速較大，可能在一個 dt 內掉落大於一個垂直間距，使得模式無法解析而停止。另外可能的原因在於，因為本研究同時提高水平和垂直的解析度，颱風登陸之後因為遇到複雜地形，過密的網格可能產生過大的垂直速度，使得模式無法收斂而停止所致。經多次嘗試後，以本研究 45 層(底層為類似 31 層的作法，頂層特別加密的結構)的設定是垂直解析度最高且能完成全程模擬，加上使用 WDM6 以外的三種雙矩量微物理方案，在 45 層的結構下仍然無法完成颱風登陸之後的模擬，故垂直解析度的實驗最後選擇 WDM6 微物理方案搭配垂直 45 層的結構進行模擬。為了有更多組模擬可以提供分析，本研究最後增加了垂直層數 21 層的模擬，是因為研究

中垂直層數的上限為 45 層，因此往下一個級數選擇垂直層數 21 層的模擬，以 21 層、31 層及 45 層跨三個級數進行研究。

第三組實驗為不同的雙矩量微物理參數化比較，包含 WDM6、Thompson、Morrison 及 Milbrandt and Yau 四種參數化方案，後三組模擬除了調整微物理參數化方案，其餘設定皆與 WDM6_31 相同。

第三章、方法介紹

3-1 微物理參數化法說明

首先說明單矩量和雙矩量方案在模式計算上的差異情形。

本論文研究不只著重在雨滴粒徑分佈，另外包含各種水相粒子(如雲冰、雨水、雲水等等)的粒徑分佈。在 WRF 這類數值模式中，會以數學方程式描述各種水相粒子的粒徑與粒子濃度(concentration)的關係。

對於模式來說，透過式(3.1)、(3.2)，由粒徑 D 也可以求得降水粒子的質量和終端落速，這些資訊可以描述模式中各種降水粒子的轉換或成長。也就是說，如果能得到較符合現實情況的粒徑分佈，應可以合理地得到較好的降水模擬結果。

$$m_x(D) = c_x D^{d_x} \quad (3.1)$$

$$V_x(D) = \gamma a_x D^{b_x} \quad (3.2)$$

在此介紹最常見的 Gamma 粒徑分佈。Gamma 分佈可以用式(3.3)來表示：

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D} \quad (3.3)$$

其中 $N(D)$ 表示單位體積水氣中粒徑 D 的降水粒子個數，(3.3)式中包含 Gamma 分佈的三個參數： N_0 、 μ 及 λ ，分別控制 Gamma 分佈的 y 軸截距(僅在 $\mu=0$ ，即 Marshall-Palmer 分佈時 N_0 才為 y 軸截距)、形狀(寬窄)及斜率。

一般來說，模式中以(3.4)、(3.5)式分別對質量混合比 q_x (x 表示各種水相粒子)和總個數 N_T 進行預報，等式的右邊各項分別表示平流項、亂流混和項、沉降項及微物理源匯項；另外依據不同的微物理參數化方案，源匯項可能包含更多的作用項。

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot (\rho q_x \vec{U}) + TURB(q_x) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho q_x V_{Qx}) + \frac{dq_x}{dt} \Big|_s + \dots \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial N_{Tx}}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (N_{Tx} \vec{U}) + TURB(N_{Tx}) + \frac{\partial}{\partial z} (N_{Tx} V_{Nx}) + \frac{dN_{Tx}}{dt} \Big|_s + \dots \quad (3.5)$$

單矩量微物理參數化法僅利用(3.4)式預報降水粒子的質量混合比，透過

(3.6)式推得 λ_x ，其中(3.6)式 C_x 和 d_x 為常數， ρ 則表示空氣的密度。此外，單矩量方案中降水粒子總個數為定值，表示不使用(3.5)式對 N_{Tx} 進行預報，且 N_0 為一個定值。雙矩量方案除了使用式(3.4)、(3.6)式外，另外也利用(3.5)式預報降水粒子總個數，透過(3.7)式推得 N_{0x} 。最後再將 λ_x 和 N_{0x} 代回Gamma分佈(3.3)式中，即可以隨著每次預報更新粒徑分佈。雙矩量方案因為多了對於水相粒子總個數的預報，計算時比起單矩量方案更費時一些。

$$\lambda_x = \left[\frac{\Gamma(1+d_x+\mu_x) C_x N_{Tx}}{\Gamma(1+\mu_x) \rho q_x} \right]^{\frac{1}{d_x}} \quad (3.6)$$

$$N_{0x} = N_{Tx} \frac{1}{\Gamma(1+\mu_x)} \lambda_x^{(1+\mu_x)} \quad (3.7)$$

由以上單矩量方案和雙矩量方案物理上定義的差異可知，單矩量方案的 N_0 為一個定值，不同於雙矩量方案的 N_0 為預報值，其考量到水相粒子的平流、亂流、沉降和碰撞後破碎(breaking)等物理過程。另外從數學的角度可以從兩點進行分析：第一，對於單矩量方案而言，因為 N_{0x} 皆為定值，所以由(3.7)式可以知道 N_{Tx} 和 λ_x 兩者是單調相關(monotonically related)的。也就是說，在單矩量方案裡， N_{Tx} 會因為 λ_x 增加而增加，因為 λ_x 減少而減少，乍看之下很合理，不過對於現實生活中複雜的微物理過程則不然。例如雲物理中的 accretion 和 diffusion 過程，前者的質量混合比增加，後者的質量混合比減少，但是降水粒子個數並沒有發生變化；又如聚集(aggregation)和破碎(breakup)，前者的降水粒子個數減少，後者的降水粒子個數增加，但液態水的質量混合比並沒有改變。由這些物理過程說明可以知道，單矩量方案的粒徑分佈比起雙矩量方案較不接近真實，特別是在強降雨的時候水相粒子的質量混合比增加，此時 N_{Tx} 也會增加，但是因為單矩量方案沒有考慮粒子的碰撞合併、聚集或破裂的過程，因此可能對降水強度和累積降雨量有錯誤的模擬。第二，從(3.3)式可以知道，水相粒子的質量混合比 λ_x 同時也控制了粒徑分佈的斜率，對於單矩量方案而言，在強降水時期模式會對雨滴的質量混合比預報較大的 λ_x 值，使得雨滴的粒徑分布較平緩接近

水平，也就是產生較多的大粒徑雨滴，因此在大雨時可能高估降雨極值。

以下針對本論文研究中使用的五種微物理參數化方案做介紹。

3-1-1 WSM6 方案

WSM6(WRF Single Moment 6-category)是 WRF 模式中單矩量微物理方案之一，一共考慮水汽、雲水、雨水、雲冰、雪和軟雹共六種水相粒子。WSM6 方案主要是針對低緯度地區暖雨過程的模擬所設計，同時，此方案特別針對模式容易於高層大氣產生過多的冰粒子進行修正。

首先將冰的個數由原本的溫度函數改為混合比 q_i 的函數((3.8)式):

$$N_i = 5.38 \times 10^7 (\rho q_i)^{0.75} \quad (3.8)$$

當冰的個數是溫度的函數時，是假設當環境溫度到達一門檻值，雲冰粒子會自動轉換成雲冰粒子，這個設定使模式傾向產生過多的雲冰。如果將冰的個數改為質量混合比的函數，可能產生較多的小顆粒冰粒子。另外，WSM6 方案也降低冰粒子透過凝華成長的速率，並且將冰的平均粒徑由 $16.3 \mu m$ 降為 $11.9 \mu m$ 。

WSM6 方案將雪的生成條件設定為:當環境越低溫，由冰轉換為雪的機制會受到抑制，同時雪本身的聚集(aggregation)成長和凝華成長會更有效率。因此在暖雨過程中，會加速雲冰轉換為雪花的過程，使得冰晶粒子減少但雪花增加。

最後 WSM6 方案也提高雲水碰撞合併產生雨水的效率。

3-1-2 WDM6 方案

WDM6(WRF Double Moment 6-category)方案與先前的 WSM6 方案大致相同，不過特別預報暖雨過程中雨水和雲水的粒子個數。另外，WDM6 方案

也預報 CCN 的粒子個數，並且考慮到 CCN 的活化過程。

3-1-3 Thompson 方案

與先前的 WDM6 方案相同，Thompson 方案同樣考慮六種水相粒子。

Thompson 方案的發展，主要是針對中緯度地區冬季混合相位的風暴系統進行模擬使用，特別是為了對飛機積冰做出預報，進一步維護飛航安全。研究指出，當模式中雲主要是由雪花而不是冰晶構成，會消耗過多的液態水，使得飛機的積冰不能被預報。相反地，如果對雪花和冰晶的預報低估，則通常是產生過多的過冷雲水或是過冷毛毛雨(Cober et al. 2001)。

因此，Thompson 方案對雲冰的初始化，參考 Cooper(1986)的式子(即(3.9)式)，並且必須在「空氣已經飽和，溫度低於攝氏零下 5 度，且水汽的過飽和比必須高於 5%」的前提下，冰晶的生成機制才會啟動。透過這種較嚴苛的約束條件能夠確保冰晶的生成更符合中緯度地區的真实環境。

$$N_i = 0.005e^{[0.304(T_0-T)]} \quad (3.9)$$

Thompson 方案對雨滴的調整，主要是為了模擬中緯度冬季的小毛毛雨滴(drizzle)，因此忽略了水汽凝華對雨滴成長的影響。另外將雨滴的最小平均粒徑限制為 $50 \mu m$ ，同時也減少了小雨滴的終端落速，這些調整使得雨滴是以毛毛雨形式在空氣中可以停留較久的時間。

最後對於雪花的修改，將雪花的 PSD 設定為降冪次分佈(power-law distribution)((3.10)、(3.11)式)。

$$N(D) = \frac{M_2^4}{M_3^3} \left[490.6e^{-20.78\frac{M_2}{M_3}} + 17.46\left(\frac{M_2}{M_3} D\right)^\mu e^{-3.29\frac{M_2 D}{M_3}} \right] \quad (3.10)$$

$$M_n = \int D^n N(D) dD \quad (3.11)$$

(3.10) (3.11) 式即圖 3.1(Brandes et al. 2007 Fig.1)中綠色實線。圖 3.1 中藍色黃色的點為美國中部地區 2003 到 2005 年，每年的十月到隔年四月的降雪事件觀測資料，一共包含了 113 小時的觀測。過去許多人嘗試使用不同

的 PSD 方程來描述此處的雪，不過 Thompson et al.(2008)使用了降冪次分佈，以 (3.10)、(3.11) 式來描述最為貼近。使用降冪次分佈，特色在於 Thompson 方案能夠產生較多小粒徑的雪花粒子而較少大粒徑的雪塊。

3-1-4 Morrison 方案

Morrison 方案同樣考慮六種降水粒子，其主要是為了氣候模式的微物理過程模擬而發展，因為極區雲系統對於輻射傳輸有很大的相關性，所以 Morrison 方案特別針對極區混合相位的雲系進行修正。

對冰晶來說，Morrison 方案考慮了冰核(IN)的異質成核過程，但是假設冰核的總個數不會改變。另外將軟雹和雪花的總個數調整為和質量混合比有單調關係(式(3.12))，也就表示兩種水相粒子的最大平均半徑為一個定值。

$$D_{mx} = \left[\frac{\rho q_x}{C_x N_{Tx}} \right]^{1/d_x} \quad (3.12)$$

最後，Morrison 方案限制了雨滴的最大平均半徑為 0.9mm，同時為了簡化計算過程，此方案不考慮雪花和軟雹的融化對於雨水成長的影響。

3-1-5 Milbrandt and Yau 方案

Milbrandt and Yau 方案由加拿大麥吉爾(McGill)大學發展，不同於低緯度地區，Milbrandt and Yau 方案特別需要模擬中高緯度地區降雪的冰相過程，所以除了考慮原先的六種水相粒子，另外將冰雹列入第七類水相粒子。

Milbrandt and Yau 方案中，將冰晶形狀定為 bullet rosettes，是因為 bullet rosettes 是在中高緯度的超級對流胞(supercell)中常出現的冰晶形狀，而其枝狀的分佈利於冰晶粒子的聚集並成長。此外 Milbrandt and Yau 方案還將冰粒子的最大粒徑提高到 5mm，但是比起 Morrison 方案來說，Milbrandt and Yau 具有較小的終端落速。這個設定使冰晶能在高層大氣停留更久，更

有機會生成較大的冰晶粒子。

對於雨滴的調整而言，Milbrandt and Yau 方案將雨滴的最大平均半徑提高至 5mm，在 Morrison and Milbrandt (2011)的研究中，比較 Morrison 方案和 Milbrandt and Yau 方案對於理想風暴降雨量的影響，發現因為 Milbrandt and Yau 的雨滴粒徑大於 Morrison，使得終端落速也是 Milbrandt and Yau 較大，當雨滴落到地面時，大雨滴的總表面積和會小於小雨滴的總表面積和，使得冷池的強度是 Milbrandt and Yau 較弱。因此在一段時間的模擬中，Milbrandt and Yau 方案少了冷池激發的二次對流持續帶來降雨，所以累積雨量會比 Morrison 方案要來的低。

對於冰雹的預報而言，此方案則是詳細的考慮其他三種冰相粒子(雲冰、軟雹和雪花)因碰撞結合產生冰雹的物理過程。

表 3.1 整理了四種雙矩量方案，預報了不同水相粒子的質量混合比和總個數。表中 v 代表水汽，c 代表雲水，r 代表雨水，i 代表雲冰，s 代表雪花，g 代表軟雹，h 代表冰雹，CCN 則代表雲凝結核。其中雙矩量方案分別對於六或七種水相粒子進行質量混合比預報，WDM6 方案著重在暖雨的模擬，特別預報雲水、雨水和 CCN 的總粒子個數。Thompson 方案則預報雨水和雲冰的總粒子個數。Morrison 方案和 Milbrandt and Yau 方案則對除水汽外的五項、六項降水粒子總個數進行預報。

3-2 降水校驗參數

本論文研究主要是透過雲微物理參數化法比較及垂直解析度調整，改善過去數值模式對於台灣地形迎風面的降水高估現象，特別針對 24 小時與 72 小時累積降雨而言。因此在降水校驗上，除了以主觀的分析判斷得到定性結果，另一方面也使用四種常見的校驗參數，計算每一組模擬累積降雨的技術得分，以得到較定量的結果。降水校驗的時間為 2009 年 8 月 7 日

至 8 月 8 日兩天，因為 8 月 7 日至 8 日是莫拉克颱風接近台灣到登陸並遠離台灣的時期，整段過程颱風都在 WRF 模式第三層網域中，可以得到最高解析度的降雨資料，因此只校驗 8 月 7 日至 8 日兩天的累積降雨。

校驗的過程中需要觀測與模擬在同一個點上的降雨資料，而觀測和模式網格點幾乎不會在同一點上，所以必須經過內插才能得到同一點上的降雨資料。一般來說內插的方法可以分為兩類：一是將模式網格點的資料內插到觀測點上進行校驗，二是反過來將觀測點的降雨資料內插模式網格點上，以下說明兩種方法的利弊。方法一的優點在於，因為本研究中模式的網格點數比起觀測點數較多，從統計的觀點來看，從多數點內插到少數點是比較具有代表性的，此外，在假設觀測的誤差很小的情況下，傾向不更改觀測資料，以原始的觀測資料(假設很接近真值)作為校驗的標準。方法一的缺點在於，如果觀測資料的位置並不是平均分佈，例如台灣的觀測點分佈平地多、山地少，如果以方法一進行校驗，校驗的結果就比較偏向評估模式對平地降雨的預報能力，而比較少對地形上降雨能力的評估。方法二的優點在於，經過內插後能得到較多筆的資料進行校驗，不過同時也是方法二的缺點，將數量較少的觀測資料進行內插後，平均分佈在數量較多的模式網格點上，這樣在統計上的代表性比起方法一可能較低，並且利用距離遠近作為內插的標準，在由少數點內插到多數點的過程中，可能對地形上比較細部的降雨分佈會有誤導。綜合以上，本篇研究選擇方法一，將模式網格點的降雨資料內插到觀測的點上進行降水校驗。

校驗的步驟如下:首先取得中央氣象局 399 個測站(包含 28 個測站和 371 個自動雨量測站)的逐時降雨資料，分別計算每個測站 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天的 6 小時、24 小時累積降雨。同時計算各組模擬的第三層網域(水平網格間距為 1 公里)，台灣陸上每一個格點的 6 小時及 24 小時累積降雨，並且依照距離使用 Cressman 分析方法將網格點上的累積降雨內插到觀測

站的 399 個點上。降水校驗即是以這 399 個測站點的觀測和模式資料進行計算，包含預兆得分(TS)、公平預兆得分(ETS)、偏離係數(BS)和均方根誤差(RMSE)四種方法，詳細的降水校驗方法分在以下各小節中各別說明。

四個降水校驗方法中，預兆得分(TS)、公平預兆得分(ETS)和偏離係數(BS)在計算時需要定義不同的降水門檻值，又莫拉克颱風在侵台期間為台灣帶來超強降雨，所以選擇中央氣象局對於豪雨以上等級降雨作為校水校驗的門檻值。包括 24 小時累積降雨量大於 130 毫米，定義為「豪雨」；24 小時累積降雨量大於 200 毫米，定義為「大豪雨」；24 小時累積降雨量大於 350 毫米，定義為「超大豪雨」。此外，因為氣象局並未對 6 小時累積降雨作雨量等級分類，在本篇研究中，6 小時累積降水校驗的門檻值定義為 24 小時累積降雨門檻值的四分之一，即 6 小時累積降雨量大於 32.5 毫米為「豪雨」；6 小時累積降雨量大於 50 毫米為「大豪雨」；6 小時累積降雨量大於 87.5 毫米為「超大豪雨」。

3-2-1 預兆得分(TS)

要使用預兆得分(TS)、公平預兆得分(ETS)和偏離係數(BS)來進行降水校驗，首先必須定義 X、Y、Z、W 四個數值。X 代表預報有降雨且超過門檻值，觀測也有降雨且超過門檻值的次數；Z 代表預報有降雨超過門檻值，但觀測沒有超過門檻值或沒有降雨的次數；Y 代表預報沒有降雨或有降雨但沒有超過門檻值，不過觀測有降雨超過門檻值的次數；W 則代表預報和觀測都沒有降雨或有降雨但沒有達到門檻值的次數。利用以上四個數值加以計算可以得到模擬的降水校驗分數。

預兆得分(TS)的定義如 (3.13) 式。預兆得分可以表示模式正確預報降水強度的能力。預兆得分介於 0 和 1 之間，分數越接近 1 則表示模式對於降水預報能力越好；不過預兆得分有一個缺點，當 X、Y 遠大於 Z 時，會

使預兆得分出現過高的現象。

$$\text{預兆得分(TS)} = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (3.13)$$

3-2-2 公平預兆得分(ETS)

公平預兆得分(ETS)的定義如 (3.14)、(3.15) 式所示。其中 C 表示模式隨機猜測可以正確預報降水的次數，即模式預報有降水的次數(X+Z)，乘上隨機猜測可以正確預報降水的機率(X+Y)/(X+Y+Z+W)，可以得到模式隨機猜測可以成功預報降雨的次數。所以公平預兆得分將兩種情況屏除在外，再計算模式預報降雨的能力：第一是觀測和預報都沒有降水或未達門檻值(W)，第二是模式隨機猜測可以成功預報降雨。因此這種校驗比起預兆得分更為可信，也可以避免預兆得分在(X+Y)過高可能發生得分過高的情形。公平預兆得分的最大值為 1，最小可能小於 0，得分越接近 1 表示模式的降雨預報能力越好。

不過公平預兆得分(ETS)也有其缺失，造成可能誤導使用者的情況。主要是由於 C 的計算包含觀測降雨達門檻值(X+Y)項，當全台灣降雨幾乎都超過門檻值時，(X+Y)項會變的很大，(Z+W)變得很小，使得 C 值很接近於 1，所以公平預兆得分會變得很小或甚至變為負的，當公平預兆得分小於 0 時，物理上則表示模式預報降雨的能力低於隨機猜測機率。

$$\text{公平預兆得分(ETS)} = \frac{X-C}{(X-C+Y+Z)} \quad (3.14)$$

$$C = \frac{(X+Z)(X+Y)}{(X+Y+Z+W)} \quad (3.15)$$

3-2-3 偏離係數(BS)

偏離係數(BS)的定義如 (3.16) 式。偏離係數表示模式預報降雨達到門檻的次數，與觀測降雨達到門檻次數的比值。偏離係數大於 1 表示模式的雨量預報有正偏差(高估)，小於 1 表示有負偏差(低估)，等於 1 則表示無偏差。

$$\text{偏離係數(BS)} = \frac{(X+Z)}{(X+Y)} \quad (3.16)$$

以上三種降水校驗參數，常用於定量評估模式降雨預報能力，不過使用時必須要留意各種參數因為定義造成的缺點。此外，這三種降水校驗都只以點(觀測與模式皆是)的降雨量作為校驗的依據，並沒有考慮到颱風的路徑和移速，可能為地形上帶來不同的降雨分佈:例如模式預報颱風的路徑或登陸時間可能有誤差，不過因為在觀測點上有降雨所以仍然得到很好的分數。

3-2-4 均方根誤差(RMSE)

同先前提到的，公平預兆得分(ETS)在強降雨時間較長造成全台有雨時會喪失評估得分的能力，如果單看 ETS 會使研究者對模擬的降雨預報能力造成誤解。加上前三個降水校驗參數都將降雨的能力轉換為得分，無法較具體的了解模式和觀測之間的誤差量，因此增加均方根誤差(RMSE)做為第四種降水校驗的參數。

均方根誤差的計算方式如(3.17)式所示，式中 N 表示校驗點的總個數(N=399)，P 表示模式得到的累積降雨量，O 表示觀測得到的累積降雨量，下標 i 則表示第 i 個點(i=1,N)。均方根誤差可以代表在 399 個點上，模擬的累積降雨量與觀測的累積降雨量之平均差異量，差異越大則均方根誤差越大，但沒有辦法知道其為高估或低估。

$$\text{均方根誤差(RMSE)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N-1}} \quad (3.17)$$

第四章、模擬結果

4-1 實驗一:單矩量和雙矩量方案比較

圖 4.1 為觀測與實驗一兩組模擬的雷達最大回波比較。從圖 4.1(a)可以看到，7 日 12Z 即颱風登陸之前，眼的西南側有很強的回波，並且颱風眼的形狀是長橢圓形，圖 4.1(c)WSM6_31 中，眼的形狀與觀測較為接近，特別清晰，不過若是比較台灣南方海上，雷達回波 45dBZ 以上較強回波的位子和範圍，可以看到 WDM6_31(圖 4.1(e))實驗模擬明顯過廣，WSM6_31(圖 4.1(c))實驗模擬則較窄。由圖 4.1(b)(d)(f)，8 日 00Z 時觀測在台灣西南部有較強回波，這點在 WSM6_31 和 WDM6_31 實驗都有模擬，但 WDM6_31(圖 4.1(f))仍回波過強的情形。

圖 4.2 為實驗一和觀測 24 小時累積降雨比較。圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)分別為觀測與 WSM6_31、WDM6_31 結果。圖(a)(c)(e)為 2009 年 8 月 7 日，圖(b)(d)(f)為 2009 年 8 月 8 日。圖上標明的數值及所在位置為累積降雨的極值與發生位置。比較圖 4.2(a)到(f)，WDM6_31 和 WSM6_31 實驗降雨極值位子都比觀測南偏，山區降雨的分佈有與觀測有差異，不過 WDM6_31 實驗 8 月 8 日的在中央山脈上降雨的分佈與觀測較 WSM6_31 接近，兩者皆為橢圓，推估可能是因為 WDM6_31 預報雨水和雲水的總個數，因此有機會改善原本 WSM6_31 在山區迎風面過高的降水極值。另外圖(e)中高屏平原、圖(f)中山區強降雨區的分佈與觀測較接近，是 WDM6_31 有明顯改善的地區。

圖 4.3 為實驗一和觀測 8 月 7 日至 8 月 9 日共 72 小時累積降雨比較。圖(a)為觀測值，圖(b)為 WSM6_31，圖(c)為 WDM6_31 結果。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。比較圖(a)(b)(c)三圖，其中圖(c)WDM6_31 累積降雨達 1200mm 以上的分佈，與觀測較為接近。

圖 4.4 為實驗一(藍色實線:WDM6_31、紅色實線:WSM6_31)與觀測(黑色

實線)的颱風路徑圖比較，圖上標示的時間為 UTC。在本研究中，觀測路徑為根據中央氣象局最佳分析路徑，模擬路徑則是以每六小時的 WRF 輸出結果經人為判定。海上颱風中心定義為海平面氣壓極小值點，陸上則以高度 5 公里，不受地形影響的渦旋中心作為颱風中心。

由圖 4.4 可以看到兩組模擬和觀測的路徑沒有太大差異。不過從圖 4.5 颱風的強度可以看出，登陸的時間與登陸前後的颱風強度，以 WDM6_31 更接近觀測值。此外，兩組模擬在初始場的颱風強度皆為低估，不過當模式開始積分，模擬的颱風強度快速增強，模擬 18 小時之後兩組模擬的颱風強度已經超過觀測的颱風強度。在此也顯示了模式模擬過強的颱風，選擇的雲微物理參數法並不是唯一原因，模擬的初始場也可能是影響模擬颱風強度的原因之一。

下一步為定量的降水校驗。

圖 4.6 以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果，圖 4.7 為 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻，圖 4.8 為 24 小時累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻之結果。水平軸為日期，自 8 月 7 日至 8 月 8 日共兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WSM6_31 實驗，藍色表示 WDM6_31 實驗。

從圖 4.6、圖 4.7、圖 4.8 中可以看到，8 月 7 日這天當降水門檻值越高，WSM6_31 實驗的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)比起 WDM6_31 實驗越低，偏離係數(BS-1)也隨著門檻值提高而轉正為負，另外 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天的均方根誤差皆以 WSM6_31 實驗較高。從圖 4.2(a)、(c)、(e)可以解釋這個情形:由於 WSM6_31 實驗(圖(c))對於高屏平原的 24 小時累積降雨量預報為低估所致。在 8 月 8 日這天，實驗一之兩組模擬的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)於不同門檻的差異不大，總體而言都是 WSM6_31 實

驗小於 WDM6_31 實驗，偏離係數(BS-1)兩組模擬皆在最高門檻降水量轉正為負；不論其正負，WSM6_31 實驗的偏離係數(BS-1)絕對值都大於 WDM6_31 實驗。由圖 4.2(b)、(d)、(f)得知，雖然 WSM6_31 實驗的累積雨量極大值都大於 WDM6_31 實驗，不過前者在嘉南平原與高屏平原的低估，加上中部山區的高估使得預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)反而有較低分的表現。

圖 4.9 為以 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果，圖 4.10 為 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻，圖 4.11 為 6 小時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻之校驗結果。

不同門檻的降水校驗結果類似。與先前的 24 小時累積降雨校驗結果相同，8 月 7 日這天 WSM6_31 實驗的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)比 WDM6_31 實驗低。不過到了 8 月 8 日 WSM6_31 實驗的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)比 WDM6_31 實驗高得多。偏離係數(BS-1)的部分，WSM6_31 實驗幾乎都維持在正負 1 之間，WDM6_31 實驗則是在 8 月 8 日 12Z 之後有很高的正偏差。均方根誤差則幾乎是 WSM6_31 實驗稍高於 WDM6_31 實驗。比較圖 4.9(b)和(c)，可以看到在 8 月 7 日 12 時至 8 月 8 日 00 時這段時間，WDM6_31 實驗的公平預兆得分(ETS)至少有 0.2 以上，不過偏離係數(BS-1)為負值，顯示 WDM6_31 實驗有一個小的負偏差，這兩個現象看起來有點矛盾，我們嘗試從公平預兆得分(ETS)和偏離係數(BS-1)兩個參數的定義配合圖 4.12(a)、(e)解釋這個問題。WDM6_31 實驗在基隆以南至整個東半部，降雨的分佈是比觀測資料稍微疏的，因此在計算偏離係數(BS-1)時，會產生一個小的負偏差。此外 WDM6_31 實驗在蘭陽平原與中央山脈至屏東南段都有明顯的高估降雨，推測是使 WDM6_31 實驗的公平預兆得分(ETS)較高的原因。不過要注意公平預兆得分(ETS)和偏離係數(BS-1)畢竟只是點對點的校驗，因為本研究是對觀測點進行校驗，所以觀測

點在山區、平地的分佈密度差異也可能是影響校驗結果的原因之一。

選擇 8 月 7 日 06Z 以及 8 月 9 日 00Z 兩個時段進行討論。前者是 WSM6_31 實驗的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)比 WDM6_31 實驗低，並且 WSM6_31 實驗的均方根誤差(RMSE)大於 WDM6_31 實驗時。後者是 WSM6_31 實驗的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)明顯比 WDM6_31 實驗高得多，另外 WDM6_31 實驗有很高的正偏差值時。

比較圖 4.12 (a)、(c)、(e) 可知，因為 WSM6_31 實驗對於台灣西部平原地區和中央山脈北段皆有明顯低估降水的情形，WDM6_31 實驗的累積降雨分布與觀測較接近，雖然新竹桃園地區累積降雨量為高估，但是對於預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)而言，只要超過門檻值即為得分，因此 WDM6_31 實驗仍有較高的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)。另外自 8 月 8 日 06Z 時起，觀測與模擬的累積降雨都逐漸上升(圖 4.11(e))，這使得計算公平預兆得分(ETS)時的隨機猜測值 C 增加，使兩組模擬的公平預兆得分(ETS)下降，但是圖 4.11(a)(b)卻表示 WSM6_31 實驗仍然有較高的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)。比較圖 4.12 (b)、(d)、(f) 可知，由於在觀測有降雨的地方(中部平原至中央山脈西側迎風面)，WSM6_31 實驗比起 WDM6_31 實驗有分布較廣的高估降雨區域，加上 WDM6_31 實驗特別在台中以北的平原地區有降雨，這是在觀測與 WSM6_31 實驗都沒有發生的，也就表示 WDM6_31 實驗在計算預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)時有較大的 Z 值(預報降雨有超過門檻值但觀測沒有降雨或低於門檻值)，使得分母的值變大。綜合以上兩個原因，可以解釋 WSM6_31 實驗在此時預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)仍有很高的值。同樣的原因(WDM6_31 實驗有較大的 Z 值)，也可以解釋 WDM6_31 實驗為什麼有較大的偏離係數(BS-1)。

4-2 實驗二:不同垂直解析度比較

圖 4.13 為觀測與實驗二中三組模擬的雷達最大回波之分析比較。圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)分別為觀測、WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 結果。圖(a)(c)(e)(g)為 2009 年 8 月 8 日 00Z(莫拉克颱風登陸前一小時結果)，圖(b)(d)(f)(h)為 2009 年 8 月 8 日 12Z(莫拉克颱風移出台灣陸地結果)。

8 月 8 日 00Z 為颱風登陸前一小時，圖(c)WDM6_21、圖(e)WDM6_31 及圖(g)WDM6_mix45 實驗皆模擬到台灣西南部地形上的強回波雨帶，不過僅圖(c)WDM6_21、圖(e)WDM6_31 模擬到高雄外海的回波雨帶。

8 月 8 日 12Z 為颱風已移出台灣，由圖 4.13(b)觀測中可以看到在嘉南地區有一道東西向的強回波雨帶，從位置上來看，同樣以圖(h)WDM6_mix45 實驗掌握較好，圖(d)WDM6_21 實驗、圖(f)WDM6_31 實驗則稍微偏南在高雄、屏東平原地區。

圖 4.14 比較觀測和實驗二中三組模擬的 24 小時累積雨量。圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)分別為觀測、WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45。圖(a)(c)(e)(g)為 2009 年 8 月 7 日累積雨量，圖(b)(d)(f)(h)為 2009 年 8 月 8 日累積雨量。圖中左上角黑色框框表示台灣陸地上 24 小時平均累積雨量，圖上標示的是降雨極大值(mm)。我們可以看到圖(g)(h)WDM6_mix45 實驗在地形上降雨極大值皆更降低，特別是圖(h)8 月 8 日全天累積雨量和 1500 毫米的強降雨區比起前兩組實驗，可以改善分佈過廣的情形。比較觀測和實驗二中三組模擬 8 月 7 日至 8 月 9 日共 72 小時累積雨量(圖 4.15)，也可以得到同樣的結果。

接著進行降水校驗。

圖 4.16 以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果，圖 4.17 為 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻，圖 4.18 為 24 小時

累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻之結果。水平軸為時間，自 8 月 7 日至 8 月 8 日共兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WDM6_21 實驗，藍色表示 WDM6_31 實驗，綠色表示 WDM6_mix45 實驗。

不同垂直解析度結果在不同門檻值的降水校驗分數變化趨勢類似，但隨著降水門檻值提高，各組模擬的得分差異更加明顯。總體而言，8 月 7 日這天三組模擬的預兆得分(TS)和公平預兆得分(ETS)分數差異不大，不過以 WDM6_31 稍高，偏離係數(BS)以 WDM6_31 實驗有最大正偏差，均方根誤差則是以 WDM6_21 實驗、WDM6_31 實驗較高。從 24 小時累積雨量圖 4.14(a)(c)(e)(g)可以解釋各組模擬得分差異的原因: WDM6_31 實驗(圖 4.14(e))在雪山山脈、中部平原以及雲林嘉義山區的累積雨量，為三組模擬實驗中高估最多且分佈最廣的，又因為在計算預兆得分(TS)和公平預兆得分(ETS)時，定義降雨量高於門檻即得分，因此 8 月 7 日這天以 WDM6_31 實驗得到最高的預兆得分(TS)、公平預兆得分(ETS)和正偏離係數(BS)，同時 WDM6_31 實驗也因此有較大的均方根誤差(RMSE)。另一方面，WDM6_21 實驗(圖 4.14(c))則是因為在雪山山脈和中央山脈南段有過高的降雨，使得均方根誤差(RMSE)亦有較高值。

到了 8 月 8 日，WDM6_21 實驗的偏離係數(BS)和均方根誤差(RMSE)不僅明顯較前一日上升，也比 WDM6_31 實驗、WDM6_mix45 實驗更高。從圖 4.14(b)(d)(f)(h)比較可以看到，WDM6_21 實驗(圖 4.10(d))在中部山區有較大高估，造成降雨預報上有最大正偏差值，此外在台中至台南平原地區，WDM6_21 實驗(圖 4.14(d))也有明顯低估情形，綜合以上兩點，使得 WDM6_21 實驗有最大均方根誤差。

圖 4.19 為以 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果，圖 4.20 為 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻，圖 4.21 為 6 小

時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻之校驗結果。

以 6 小時累積降雨定為門檻，可以看到 8 月 7 日、8 月 8 日兩天中，各組模擬實驗對 6 小時累積降雨的預報能力，不同垂直解析度在不同門檻值的降水校驗分數變化趨勢類似。圖 4.21(c)顯示，三組模擬的偏差值(BS-1)在 8 月 8 日 12Z 時之後轉負為正，並且隨著降雨增加(圖 4.21(e))有越來越大的正偏差。由圖 4.21(a)(b)可以看到，自 8 月 8 日 06 時之後，三組模擬的公平預兆得分(ETS)突然降至 0.2 以下甚至為負，預兆得分(TS)也自 8 月 8 日 12 時之後降至 0.2 以下，顯示模式對於 8 月 8 日這天每 6 小時累積降雨量之預報能力並不佳。

分析圖 4.21(e)399 個測站點的 6 小時平均累積降雨量，可以解釋降水模擬的公平預兆得分(ETS)降低的原因為：自 8 月 8 日 06 時起，不論是觀測或模擬的累積降雨量都在上升，使得公平預兆得分(ETS)可以得到較大的隨機猜測值 C，導致公平預兆得分(ETS)減小甚至為負，表示模式的數值預報能力低於隨機猜測能力。

接著挑選 8 月 8 日 06 時與 8 月 8 日 12 時兩個時段進行討論。選擇前者的原因在於此時三組模擬的預兆得分及公平預兆得分都在降低，但是 WDM6_mix45 實驗仍可以有明顯較高的得分。選擇後者則是因為三組模擬的預兆得分皆低，均方根誤差皆高，希望從 6 小時累積降雨圖解釋這些現象。

從圖 4.22 (a)(c)(e)(g)比較可以看到，在圖(c)WDM6_21、圖(e)WDM6_31 兩組模擬實驗中，台中以北和東部地區的降雨量明顯小於觀測值，配合圖 4.23 雷達最大回波可以看到，由於 WDM6_21 實驗和 WDM6_31 實驗的眼受到地形破壞而擴大，使得台中以北受到大颱風眼壟罩，所以降雨偏弱。圖 4.22(g)WDM6_mix45 實驗則和觀測(圖(a))的降雨分佈類似，因此。8 月 8 日 06 時以 WDM6_mix45 實驗的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)最高。圖

4.22 (b)(d)(f)(h)為 8 月 8 日 12 時觀測與模擬每 6 小時累積降雨量分佈圖，造成公平預兆得分(ETS)降低的原因已經在前面說明，不過此時預兆得分同樣也降低，從圖 4.22(b)(d)(f)(h)可以看到，圖(d)WDM6_21 實驗、圖(f)WDM6_31 實驗在中部與東部平原皆有降雨量低估的情形，因為觀測(圖(b))在這些地方都有較高降雨，使得預兆得分(TS)計算時分母的 Y 值較高，使得預兆得分(TS)降低，圖(h)WDM6_mix45 實驗在中部平原與觀測降雨量接近，所以預兆得分(TS)仍然最高。

圖 4.24、圖 4.25 分別為觀測與實驗二的颱風路徑及強度比較。可以看到改變模式的垂直解析度對於模擬颱風路徑的影響很小，而且登陸的時間差異也不大；不過可以看到颱風登陸後，WDM6_21 及 WDM6_mix45 實驗颱風強度有稍微減弱的現象。

為討論實驗二中，造成三組模擬颱風強度差異的原因，我們選定 8 月 7 日 21Z(颱風登陸前)、8 月 8 日 01Z(颱風在台灣地形上)以及 8 月 8 日 12Z(颱風剛移出陸地)三個時間點做垂直剖面分析各別的颱風結構。

圖 4.26 為颱風登陸前，選取沿著颱風移動方向，西北-東南走向做垂直剖面，水平長度總長 320 公里，為避免單一剖面沒有代表性，所以在垂直颱風移動方向取 15 公里的平均。研究中之後的垂直剖面皆會同樣做空間的平均，穿越颱風的剖面會確保颱風中心也在剖面中心，選擇剖面走向時，為了可以看到颱風對地形的迎風面和背風面不同的特徵，以平行颱風移速的方向為主；如果是雨帶的剖面，則會確保選取的數個剖面能包含整個雨帶，保留雨帶中各個對流胞。此外，礙於本研究輸出資料的時間解析度較低(為一小時一筆)，所以垂直剖面在時間上沒有經過平均。

一般颱風的底層因為有海洋提供水汽與熱量，高層有抬升的雲，所以相當位溫的垂直剖面會看到，底層和高層有較高的相當位溫，中層則有相對較低的相當位溫。圖 4.27 中，圖(a)WDM6_21 實驗在垂直方向上已有上層

相當位溫較高的空氣向下混合，另外颱風眼的寬度較另外兩個模擬實驗為寬，表示受到地形破壞颱風強即將崩塌、眼向外擴張的情形。圖 4.27

(b)WDM6_31 實驗具有上述比較完整的颱風結構，顯示當時颱風結構受地形的破壞程度也不明顯，圖中西北側的眼牆也較筆直。圖(c)WDM6_mix45 實驗垂直解析度較高，從圖中可以看到相當位溫明顯開始混合，眼牆也稍有歪斜，表示颱風受到地形影響眼牆即將崩塌。

圖 4.28 為垂直剖面上雷達回波和垂直速度的比較。圖(a)WDM6_21 實驗中，因為中高層解析度較差，加上垂直速度受到模式頂層和平流層較穩定的氣流阻擋，可能導致西北側高層(7 公里以上)有垂直速度和雷達回波；因為垂直速度和雷達回波並不是從模式低層產生對流發展至中高層，因此判斷其可能為物理上不合理的垂直速度和雷達回波。圖(b)WDM6_31 實驗中高層的地方同樣會有垂直上不連續的垂直速度和回波出現，另外對於台灣地形上方。圖(c)WDM6_mix45 實驗可以看到地形附近的垂直速度分佈，並未出現如 21、31 層實驗在高層出現的垂直速度和雷達回波。因為三組模擬的設定僅垂直解析度不同，推測也許是因為 WDM6_mix45 實驗中高層有較高的解析度，可以避免高層不連續的垂直速度和回波出現。雖然該剖面已經作了空間上的平均，但高層的垂直速度和回波仍有可能是因為鄰近的對流胞傾斜的發展至該剖面中造成。

圖 4.29 為颱風在台灣陸地上，同樣選取平行颱風移動方向，西北-東南走向之垂直剖面，總長 250 公里，並取 15 公里的平均。圖 4.30 為颱風登陸後，相當位溫分佈與雷達回波 20dBZ 等值線之垂直剖面。圖(a) WDM6_21 實驗、圖(c)WDM6_mix45 實驗的眼牆崩塌情形更加明顯，但圖(b)WDM6_31 實驗西北側的眼牆仍然筆直。

圖 4.31 為 8 月 8 日 12Z，颱風移出陸地後，選取南部強回波雨帶，東西走向之垂直剖面，總長約 300 公里，並取南北 15 公里的平均。由圖中

可以看到，強回波雨帶的位置以圖(c)WDM6_mix45 實驗與觀測(圖 4.13(b))較接近，圖(a)WDM6_21 實驗、圖(b)WDM6_31 實驗則較偏南。

接著圖 4.32(a)(b)(c)為垂直剖面上雷達回波和垂直速度的比較，三組模擬實驗在西南部迎風面上都有很強的雷達回波。圖(a)WDM6_21 實驗在地形附近得到三組模擬中最強的上升和下沉速度，在迎風面可以看到垂直速度為正向上抬升的氣流，地形的背風面則有向下沉降的氣流；不過 WDM6_21 實驗在背風側又出現與沉降氣流相當強度(400cm/s)的上升氣流，這個位在背風面的上升速度於物理上似乎不太合理，加上這三個垂直速度震盪在高度上幾乎相同，不同於山岳重力波具有向上傳遞且高度逐漸增加的特性。推測有可能是因為 WDM6_21 實驗在中高層大氣的垂直解析度明顯不如 WDM6_31 實驗和 WDM6_mix45 實驗。又對於模式來說，垂直方向上能解析的最小物理現象長度為 $4\Delta z$ ，當垂直方向的網格間距過大時，模式會將較小尺度的波解析為波長較長的波，因此在模式中看到的有些長波是由於數值模式解析度不足造成，而非物理上實際存在的波動，這種情況在物理上被稱為波的折疊(aliasing)現象。即圖 4.33 中，黑色線為尺度較小的真實訊號，假設解析度過粗無法解析這麼小尺度的訊號，模式會發生折疊現象，將真實訊號解析為較大尺度的訊號，如圖中紅色線所示。

圖 4.32(b)WDM6_31 實驗仍然有垂直上不連續的垂直速度和雷達回波出現；圖(c)WDM6_mix45 實驗垂直上沒有不連續的垂直速度和雷達回波出現，且能模擬地形迎風面與背風面的抬升及下沉速度。不過同前面所說，高層的不連續的垂直速度和雷達回波也有可能是附近傾斜成長的對流進到該剖面中而出現。

為了確定以上的現象是不是僅出現在單一時間，吾人又選了 8 月 8 日 15Z 作垂直剖面的分析，水平同樣取 15 公里的平均，選取範圍如圖 4.34 所示。

圖 4.35(a)(b)(c)為圖 4.34 中垂直剖面上雷達回波和垂直速度的比較。三

組實驗中都可以模擬出地形迎風面有上升速度，背風面則有下沉速度，且速度的大小差異不大。不過圖(a)WDM6_21、圖(b)WDM6_31 實驗中，台灣西方海上的高層仍有垂直上不連續的速度場出現，顯示這個現象並不只存在於單一的時空中。垂直方向上不連續的垂直速度或雷達回波有可能是因為垂直的解析度不夠細造成，但也可能和所選取的剖面有關，因為吾人嘗試很多組剖面進行比較，發現 WDM6_21、WDM6_31 實驗並不是在每一個剖面上都有這種不連續的現象發生。

4-3 實驗三:不同雙矩量方案比較

圖 4.36 比較四種雙矩量微物理參數法與觀測的雷達最大回波，比較圖(a)(c)(e)(g)(i)發現，在颱風登陸前，觀測的雷達最大回波於颱風南半部眼牆及台灣南方海面有較強回波(大於 45dBZ)。WDM6_31 實驗(圖(c))高估回波強度，同時強回波面積分佈過廣。Thompson_31 實驗(圖(e))、Morrison_31 實驗(圖(g))和 Milbrandt and Yau_31 實驗(圖(i))都可以模擬出颱風南半部眼牆的強回波，但台灣南方海面的雨帶回波都偏弱。Thompson_31 實驗(圖(e))如同先前所說的，環境的雨滴多為毛毛雨，且在空氣中停留較久，可能因此從雷達最大回波中可以看到，其降雨的強度小但範圍廣。

圖(b)(d)(f)(h)(j)中可以看到，觀測中颱風移出台灣後，在台南外海至中央山脈有雨帶回波(東西走向)，WDM6_31 實驗(圖(d))同樣是強回波範圍分佈過廣，另外雨帶的位置也偏南，是四組模擬中與觀測相差最大的。而 Thompson_31 實驗(圖(f))、Morrison_31 實驗(圖(h))和 Milbrandt and Yau_31 實驗(圖(j))的模擬中，雨帶的位置都接近台南，唯 Milbrandt and Yau_31 實驗(圖(j))的雨帶形狀較不明顯。

圖 4.37、圖 4.38 為實驗三各組模擬和觀測 24 小時、72 小時累積降雨比較。Thompson_31 實驗(圖 4.37(e)(f)、圖 4.38(c))在累積降雨極值比起

WDM6_31 實驗(圖 4.37(c)(d)、圖 4.38(b))改善更多。Morrison_31 實驗(圖 4.37(g)、圖 4.38(d))、Milbrandt and Yau_31 實驗(圖 4.37(i))在累積雨量極值表現雖然不一定比 WDM6_31 實驗好，但是兩種方案的台灣陸地上平均降雨都比 WDM6_31 實驗低。配合台灣陸地平均累積雨量推測可能是因為兩方案在台灣地形上強降水分佈較窄，雨區過度集中在山區，才會使降雨極值過高但陸上平均降雨得以降低。

接下來進行定量的強水校驗。圖 4.39 以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果，圖 4.40 為 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻，圖 4.41 為 24 小時累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻結果。水平軸為時間，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中藍色表示 WDM6_31 實驗，紅色表示 Thompson_31 實驗，綠色表示 Morrison_31 實驗，紫色表示 Milbrandt and Yau_31 實驗。

不同雲微物理參數化方案在不同門檻中的降水校驗結果類似，不過門檻值越高，各組模擬實驗之間的差異更明顯。從圖 4.41 可以看出，8 月 7 日這天以 WDM6_31 實驗的預兆得分(TS)、公平預兆得分(ETS)與偏離係數(BS)有最大正值，但四組模擬都有很大的均方根誤差(RMSE)(圖(d))。從圖 4.37 可以解釋各組模擬實驗降水校驗得分差異的原因:WDM6_31 實驗(圖(c))在西部平原和中央山脈比起觀測都高估累積降雨量，加上雨量高估的範圍較廣，在預兆得分(TS)和公平預兆得分(ETS)計算時，因為雨量超過門檻值所以得到高值，偏離係數(BS)減 1 也為正值。Morrison_31(圖 4.37 (g)) 實驗與 Milbrandt and Yau_31 實驗(圖 4.37(i))在高屏平原低估累積雨量，可能因此均方根誤差(RMSE)接近 80 毫米。另外，Thompson_31 實驗(圖(e))在西部平原低估更多，偏離係數(BS-1)為負，均方根誤差(RMSE)超過 80 毫米。

8 月 8 日這天各組模擬實驗差異不大，但 WDM6_31 實驗(圖 4.41(d))有最

大的均方根誤差(RMSE)。從圖 4.37(b)(d)(f)(h)(j)可以看出，最大的差異可能在於 WDM6_31 實驗(圖 4.37(d))在高屏地區有嚴重高估的累積降雨量。

圖 4.42 以每 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果，圖 4.43 為每 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻，圖 4.44 為每 6 小時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻之校驗結果。

以圖 4.44 為例，從圖(e)可以看到各組模擬自 8 月 8 日 00Z 起每 6 小時累積雨量有上升的趨勢，偏離係數(BS-1)也從 8 月 8 日 06Z 轉負為正；隨著累積雨量越來越高，偏離係數(BS-1)也有越大的正值。另外各組模擬在 8 月 8 日 06Z 起，公平預兆得分(ETS)(圖(b))降低至小於 0.2，甚至有負值出現，與實驗二相同，皆因為觀測的降雨量在增加，使得公平預兆得分(ETS)的值降低。

研究選擇三個時間，分析各組模擬實驗中降水校驗得分差異的原因，包含 8 月 7 日 06Z、8 月 8 日 06Z 及 8 月 9 日 00Z 時。第一個時間點為颱風登陸前一天 WDM6_31 實驗有領先的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)；第二個時間點為颱風在台灣陸地上，Thompson_31 與 Milbrandt and Yau_31 實驗有較高的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)，WDM6_31 實驗則降低；第三個時間點為颱風正在遠離台灣，各組模擬實驗的預兆得分(TS)與公平預兆得分(ETS)皆降低，但唯獨 Milbrandt and Yau_31 實驗仍有預報能力之時。

圖 4.45 為觀測與實驗三之每 6 小時累積降雨圖。圖(a)(b)(c)、圖(d)(e)(f)、圖(g)(h)(i)、圖(j)(k)(l)、圖(m)(n)(o)分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗結果。圖(a)(d)(g)(j)(m)為 2009 年 8 月 7 日 06Z，圖(b)(e)(h)(k)(n)為 2009 年 8 月 8 日 06Z 時，圖(c)(f)(i)(l)(o)為 2009 年 8 月 9 日 00Z 時。

8 月 7 日 06Z 時，WDM6_31(圖(d))在桃竹苗山區及高屏平原、中央山脈

等地區有較好預報結果甚至高估降水，使得 WDM6_31 實驗有最高的預兆得分(TS)和公平預兆得分(ETS)。8 月 8 日 06Z 時 WDM6_31 實驗(圖(e))因為在中部以北地區之雨量皆為低估，Thompson_31 實驗(圖(h))和 Milbrandt and Yau_31 實驗(圖(n))則是在高屏平原與雪山山脈有較好的預報結果，使得降水校驗得分提升。8 月 9 日 00Z 時，從圖(c)(f)(i)(l)(o)比較可以看出，Milbrandt and Yau_31 實驗(圖(o))的降雨預報能力並不可能得到最高的公平預兆得分，配合圖(4.44)(e)，可以看到其他各組模擬的公平預兆得分降低，是因為當時累積降雨量正在增加中，使得公平預兆得分(ETS)喪失評估模式預報降雨的能力；相反地，Milbrandt and Yau_31 實驗在當時累積雨量反而是在降低中，可能因此避免了這個問題，得到較高的公平預兆得分(ETS)。

圖 4.46 為實驗三各組模擬實驗與觀測颱風路徑比較。除了 Milbrandt and Yau_31 實驗在模擬過程中最為南偏外，各組實驗的路徑差異不大。圖 4.47 颱風登陸時間的模擬上也是以 Milbrandt and Yau_31 實驗提早登陸最多，強度在颱風登陸後到移出台灣這段時間則稍弱。這些結果再一次顯示公平預兆得分(ETS)在觀測累積降雨量增加時，產生可能誤導使用者情形；另外公平預兆得分(ETS)也沒有辦法將颱風路徑、強度預報的準確度納入作為評估降雨得分的依據。

接著討論不同微物理參數化方案在累積降雨、回波有不同模擬表現的原因。本論文研究認為在台灣地形上，颱風環流受到抬升的作用帶來降雨，是微物理參數化法有最大差異的地方，因此我們在台灣西南部迎風面作垂直剖面，選取的範圍從台灣海峽到中央山脈東側共 245 公里，南北 25 公里的空間平均(圖 4.48)。在此選取四組模擬中相同位置，在相同地形條件下，框框內有最強回波的時間(不同 UTC 時間)進行討論。

圖 4.49 為相當位溫的垂直剖面。可以看到除了 WDM6_31 實驗(圖(a))在低層大氣有較多的水汽，其他三組實驗低層大氣都有較乾的空氣，使得

底層的水汽量降低，推測這也是為什麼 WDM6_31 實驗低層有特別強的雷達回波，累積降雨極值也特別高的原因之一。

圖 4.50 比較四組模擬雷達回波和垂直速度的差異。WDM6_31 實驗(圖(a))的雷達回波和觀測(圖(e))不同，被限制在高度 9 公里以下，並且在台灣地形上有很強的抬升。其他三種方案的垂直速度和回波可以高達 15 公里，Thompson_31 實驗(圖(b))於迎風面的上升速度分佈較廣，Milbrandt and Yau_31 實驗(圖(d))在地形上垂直速度最弱。

圖 4.51 為四組模擬實驗中各種水相粒子的質量混合比。因為莫拉克颱風並沒有雨滴譜儀的觀測資料，故本研究僅能定量的比較各組模擬在垂直剖面上的水相粒子分佈，並無觀測的資料進行驗證。圖 4.51 中可以看到 0 度 c 溫度線在各組模擬的高度差異不大，顯示 Melting layer 的高度大約在 5 到 6 公里高。

WDM6_31 實驗(圖(a))因為多數 CCN 被活化，並且增加雲水轉換為雨水的效率，使得 6 公里以下高度，幾乎沒有雲水存在，推測可能因此產生過多的降雨，這個現象可能解釋了先前雷達回波分佈過強且過廣的現象。不過也有可能是因為本研究各層網域為 two-way，但最外層網域不會補充新的 CCN，在模擬超過兩天之後，網域內 CCN 已經被消耗殆盡，才會幾乎沒有雲水存在。此外，WDM6_31 實驗對於冰晶和雪花的限制在圖中也可以看到，僅有少量的冰晶和雪花生成，軟雹則出現在 Melting layer 附近。

Thompson_31 實驗(圖 b))由於將雪花的 PSD 改為冪次分佈，加上終端落速較小，可能使得中高層幾乎全為雪花的分佈，這也顯示了 Thompson 方案原本是為了能在中緯度冬季風暴使用而設計，使得軟雹和冰晶的量較少。另外，Thompson 方案的雨水設定為毛毛雨的特性，從剖面的雨水混合比也可以看到，比起 WDM6_31 實驗(圖(a)) (WDM6_31:海上 1.2~2.4 g/kg；迎風面上 3.6~4.8 g/kg)來說質量少了許多(Thompson_31:海上 1.2 g/kg；迎風

面上 1.2~2.4 g/kg)，只有地形迎風面上有藉由抬升才有較大的雨水混合比。

Morrison_31 實驗(圖(c))和 Milbrandt and Yau_31 實驗(圖(d))兩者模擬的水相粒子混合比類似，不過從先前剖面的垂直速度可以看到，Morrison_31 實驗在迎風面上有明顯的抬升，雨水在迎風面上也生成較多。Milbrandt and Yau_31 實驗則在高空生成較多的冰晶，這可能和方案原先設計允許冰晶粒子成長較大和停留較久有關。

從表 4.4 各種不同冰相粒子在不同微物理參數化法的定義比較也可以看出，不同的粒子在各微物理方法中定義也不大相同，例如同樣是冰粒子，其密度和最大半徑就有不同的設定，這些定義上的差異也是造成各實驗中冰相粒子的垂直分布有所不同的原因之一。

另外，雖然使用不同的雙矩量微物理方案，比起 WDM6_31 實驗(圖(a))更能改善迎風面地形上的降雨極值；可是礙於莫拉克颱風並沒有雨滴譜儀等觀測資料可以作水相粒子分佈的驗證，因此我們無法判斷哪一個微物理參數化方案，是基於正確的理由而改善降雨模擬，並且比較適合用在台灣的降水模擬環境。

第五章、結論

本論文研究選用 2009 年莫拉克颱風做個案分析，探討改變雲微物理參數化法與調整模式的垂直解析度，對於降水模擬的影響，嘗試改善過去模式在莫拉克颱風期間於台灣地形上產生高估累積降雨的現象。研究使用 WRF 3.4 版本進行 96 小時的模擬，初始場為 ECMWF 之 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ 分析場資料，使用 3 層之 two-way interactive 巢狀網域，三層網域水平網格間距由外至內分別為 9 公里、3 公里及 1 公里。吾人設計三組實驗，包含 i) 單矩量(single-moment;WSM6_31)和雙矩量(double-moment;WDM6_31)比較，ii) 垂直分層 [21 層(WDM6_21)、31 層(WDM6_31)和 45 層(WDM6_mix45)]比較，和 iii)四種雙矩量微物理參數化法(WDM6_31, Thompson_31, Morrison_31, Milbrandt and Yau_31)比較共七組模擬。我們比較模式模擬與觀測的雷達回波、颱風路徑與強度、累積降雨極大值與水平分佈，進行定性的分析；另外也使用預兆得分(TS)、公平預兆得分(ETS)、偏離係數(BS)和均方根誤差(RMSE)四個降水校驗參數，定量地評估各組模擬對 24 小時、6 小時累積降雨的預報能力。

以下分三組實驗結果依序進行總結。表 4.1、表 4.2、表 4.3 分別為實驗一、實驗二、實驗三各組模擬的結果比較，「 \checkmark 」表示與觀測有較接近的值或者降水校驗參數有較佳表現，其餘無法定量比較或無觀測資料驗證的則以文字說明。

此外，從研究的結果可以看到，不論是調整垂直解析度，或者改變雲微物理參數化方法，對於累積降雨量的模擬仍然有很大的改進空間。欲改進模式對於累積降雨量模擬的偏差並不容易，吾人建議從兩大方向改進可能會有機會有較明顯的改善：第一個方法較為費時費力，為直接調整模式垂直解析度或改進微物理參數化法，不過光是調整垂直解析度就有無數種可能，改進微物理參數化法則是需要針對不同個案、不同天氣系統、不同季節作

長期大量的觀測，方能對於台灣地區降雨的特徵和各種水相粒子的平均粒徑、終端落速以及各種粒子間的成長和消耗過程有充分的了解，方能基於較正確的理由改進雲微物理參數化方案。第二個方法相對來說較不費時，但是需要龐大的電腦運算資源，為考量系集預報的概念，把各種雲微物理參數化方案視為各組成員的差異，或者選擇單一種雲微物理方案，對其中的 N_0 或終端落速(計算終端落速時的係數)作擾動，建立不同的系集組別進行模擬。使用系集預報可以提供機率預報的資訊，比起使用單一模式作決定性預報，更可以考量到各成員間的不確定性。

最後，值得一提的是，本論文研究結果僅是針對莫拉克(2009)颱風單一個案，對於其他侵台颱風是否依然合適，需要未來有更多的颱風個案分析方能確定。同時在垂直解析度測試方面，本論文研究最多測試到垂直 45 層，未來應增加測試至垂直 50 幾層甚至是 60 幾層，方能對降水模擬對於垂直解析度的敏感度有較完整的認識及瞭解。分析方法未來則應該加上 CFAD 討論垂直剖面上的水相粒子分佈，始能得到各組模擬間定量的分析比較。

參考文獻

- 周仲島、李清勝、鄭明典、鳳雷、于宜強，2010：「莫拉克颱風綜觀環境與降雨特徵分析」，*莫拉克颱風科學報告*。
- 簡芳菁、蕭育琪、周仲島、林沛練、楊明仁、洪景山、鄧仁星、林慧娟，2003：「MM5系集降水預報之校驗」，*大氣科學*，**31**，77–93。
- 傅佑瑜，2008：2005年台灣地區季節性降雨之特徵及颱風事件之逕流模擬，中央大學水文科學研究所碩士論文。
- 錢伊筠，2010：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，中央大學大氣物理研究所碩士論文。
- 周俊宇，2012：西南氣流實驗(IOP-8 個案)觀測分析與數值模擬：雲微物理結構特徵及參數法方案比較，中央大學大氣物理研究所碩士論文。
- Brandes, E. A., K. Ikeda, G. Zhang, M. Schonhuber, and R. M. Rasmussen, 2007: A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 634–650.
- Chang, S. W. J., 1982: The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1255–1270.
- Chiao, S., Y.-L. Lin, 2003: Numerical Modeling of an Orographically Enhanced Precipitation Event Associated with Tropical Storm Rachel over Taiwan. *Wea. Forecasting*, **18**, 325–344.
- Dawson, D. T., II, M. Xue, J. A. Milbrandt, and M. K. Yau, 2010: Comparison of evaporation and cold pool development between single-moment and multimoment bulk microphysics schemes in idealized simulations of tornadic thunderstorms. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1152–1171.
- Huang, H. L., M.-J. Yang, C.-H. Sui, 2014: Water Budget and Precipitation Efficiency of Typhoon Morakot (2009). *J. Atmos. Sci.*, **71**, 112–129.
- J.R. Picardo and S. Ghosh ,2011 :Removal Mechanisms in a Tropical Boundary Layer: Quantification of Air Pollutant Removal Rates Around a Heavily Afforested Power Plant *Air Pollution – New Developments.*,**ch13**,275-303.
- Kim, J. H., D. B. Shin, C. Kummerow, 2013: Impacts of A Priori Databases Using Six WRF Microphysics Schemes on Passive Microwave Rainfall Retrievals. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 2367–2381.
- Kimball, S. K., and F. C. Dougherty, 2006: The sensitivity of idealized hurricane structure and development to the distribution of vertical levels in MM5. *Mon. Wea. Rev.*, **134**,1987–2008.

- K.-S. S. Lim 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**, pp. 1587–1612,
- Lee, S. S., and L. J. Donner 2011: Effects of Cloud Parameterization on Radiation and Precipitation: A Comparison Between Single-Moment Microphysics and Double-Moment Microphysics. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **22-4**, 403-420
- Lindzen, R. S., and M. Fox-Rabinovitz, 1989: Consistent vertical and horizontal Resolution. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2575–2583.
- Milbrandt, J. A., and M. K. Yau, 2005a: A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3051-3064.
- Milbrandt, J. A., and M. K. Yau, 2005b: A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3065-3081.
- Milbrandt, J. A., and M. K. Yau, 2006: A multimoment bulk microphysics parameterization. Part IV: Sensitivity experiments. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3137–3159.
- Morrison, H., J. A. Curry, V. I. Khvorostyanov, 2005: A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1665–1677.
- Morrison, H., J. A. Curry, M. D. Shupe, P. Zuidema, 2005: A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part II: Single-Column Modeling of Arctic Clouds. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1678–1693.
- Morrison, H., G. Thompson, and 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.
- Morrison, H., and J. Milbrandt, 2011: Comparison of two-moment bulk microphysics schemes in idealized supercell thunderstorm simulations. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1103-1130.
- Roy, S. S.; Datta, R. K.; Bhatia R. C. & Sharma A. K. 2005 :Drop Size Distributions of Tropical Rain over South India. *Geofizika*, Vol. **22**, pp. 105-130
- Stevens, B., G. Feingold, W. R. Cotton, and R. L. Walko, 1996: Elements of the microphysical structure of numerically simulated nonprecipitating stratocumulus. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 980–1006.

- 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.
- Thompson, G., 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.
- Um, J. and McFarquhar, G. M.: Single-scattering properties of aggregates of bullet rosettes in cirrus, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 46, 757–775, 2007.
- Wu, C.-C., and Y.-H. Kuo, 1999: Typhoons affecting Taiwan: Current understanding and future challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 67–80.
- Yang, M.-J., and Q.-C. Tung (2003), Evaluation of rainfall forecasts over Taiwan by four cumulus parameterization schemes, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 81, 1163–1183
- Yang, M.-J., and Q.-C. Tung, 2003: Evaluation of rainfall forecasts over Taiwan by four cumulus parameterization schemes. *J. Meteor. Soc. Japan*, 81, 1163-1183
- Zhang, D.-L., and X. Wang, 2003: Dependence of hurricane intensity and structures on vertical resolution and time-step size. *Adv. Atmos. Sci.*, 20, 711-725.
- Zhang, D.-L., L. Zhu, X. Zhang, and V. Tallapragada 2014: Sensitivity of Idealized Hurricane Intensity and Structures Under Varying Background Flows and Initial Vortex Intensities to Different Vertical Resolutions in HWRF. *Mon. Wea. Rev.*, submitted.

表 2.1: 研究使用的七組模擬與其設定。

| 模擬 | 垂直層數 | 微物理參數化方案 | N-矩量 |
|-------------|------|-------------------|------|
| WSM6_31 | 31 | WSM6 | 1 |
| WDM6_21 | 21 | WDM6 | 2 |
| WDM6_31 | 31 | WDM6 | 2 |
| WDM6_mix45 | 45 | WDM6 | 2 |
| Thompson_31 | 31 | Thompson | 2 |
| Morrison_31 | 31 | Morrison | 2 |
| MY_31 | 31 | Milbrandt and Yau | 2 |

表 3.1: 不同雙矩量方案預報的水相粒子質量混合比和粒子濃度總個數比較。V 代表水汽，c 代表雲水，r 代表雨水，i 代表冰晶，s 代表雪花，g 代表軟雹，h 代表冰雹，CCN 則代表雲凝結核。

| | 混合比 | 粒子濃度 |
|----------------------|---------------------|------------------|
| WDM6 | v, c, r, i, s, g | CCN, c, r, |
| Thompson | v, c, r, i, s, g | r, i |
| Morrison | v, c, r, i, s, g/h | c, r, i, s, g/h |
| Milbrandt-Yau | v, c, r, i, s, g, h | c, r, i, s, g, h |

表 4.1: 實驗一中 WSM6_31 與 WDM6_31 兩組實驗結果比較。「√」表示與觀測有較接近的值或者降水校驗參數有較佳表現，其餘無法定量比較或無觀測資料驗證的則以文字說明。

| | WSM6_31 | WDM6_31 | 備註 |
|------------|---------|---------|------------------------------|
| 颱風強度 | | √ | 颱風登陸前後，WDM6_31 的颱風中心氣壓較接近觀測。 |
| 累積降雨極值 | | √ | |
| TS(24hr) | | √ | |
| ETS(24hr) | | √ | |
| RMSE(24hr) | | √ | |

表 4.2: 實驗二中 WDM6_21、WDM6_31 與 WDM6_mix45 三組實驗結果比較。「√」表示與觀測有較接近的值或者降水校驗參數有較佳表現，其餘無法定量比較或無觀測資料驗證的則以文字說明。

| | WDM6_21 | WDM6_31 | WDM6_mix45 | 備註 |
|--------------|---------|---------|----------------------------------|------------------------|
| 颱風強度 颱風路徑 | | | | 三者類似，皆高估。 |
| 迎風面垂直速度 | 最大 | | | |
| 雷達回波 | | | 8 月 8 日 12Z 颱風移出台灣時東西向雨帶位置與觀測吻合。 | WDM6_21、WDM6_31 雨帶較南偏。 |
| 垂直剖面 | | | 相當位溫可以看到眼牆崩塌。 | |
| 累積降雨極值 | | | √ | |
| TS(24hr) | | | √ | |
| ETS(24hr) | | | √ | |
| RMSE(24hr) | | | √ | |

表 4.3: 實驗三中 WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 與 Milbrandt and Yau_31(簡稱 MY_31)四組實驗結果比較。「√」表示與觀測有較接近的值或者降水校驗參數有較佳表現，其餘無法定量比較或無觀測資料驗證的則以文字說明。

| | WDM6_31 | Thompson_31 | Morrison_31 | MY_31 |
|--------------|----------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
| 颱風強度 颱風路徑 | √ | √ | √ | 誤差最大 (最為南偏) |
| 迎風面垂 直速度 | 最大 | | | 最小 |
| 雷達最大 回波 | 強回波過強， 分佈過廣。 | 回波強度最 弱，但範圍 廣。 | | |
| 垂直剖面 水相粒子 | 產生較多暖雨 過程(特別是 雨水)粒子。 | 高空產生較多 雪花粒子。 | | 高空產生較多 軟雹粒子。 |

表 4.4: WSM6、WDM6、Thompson、Morrison 與 Milbrandt and Yau(簡稱 MY)方案中對冰相粒子的定義比較。[BD=Bulk Density($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), rmax=最大粒徑(μm), rmin= 最小粒徑(μm)]

| | WSM6 | WDM6 | Thompson | Morrison | MY |
|----|-----------|-----------|----------------------|----------|----------------------|
| 雲冰 | rmax=500; | rmax=500; | BD=900; | BD=100; | BD=1000; rmax=500 |
| 雪花 | BD=100; | BD=100; | BD=100; | BD=100; | BD 隨粒徑 和質量變化; |
| 軟雹 | BD=500; | BD=500; | BD=500; rmin=250; | BD=400; | BD=400; |
| 冰雹 | | | | | BD=900; |

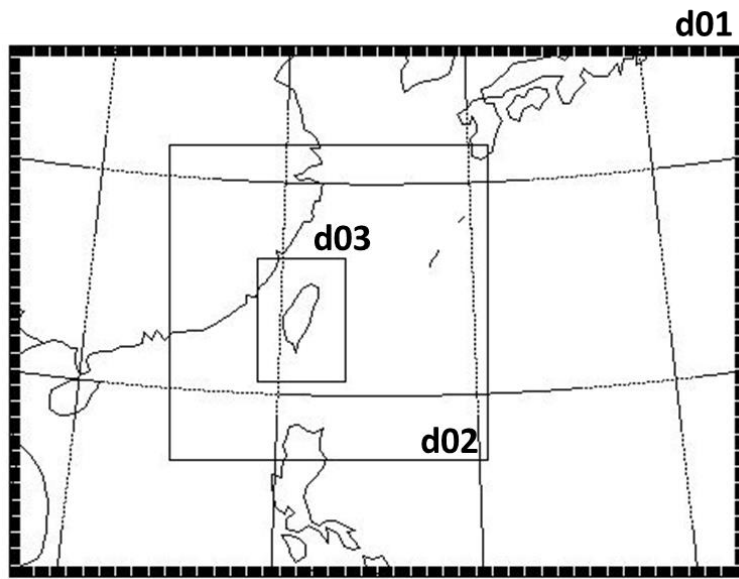
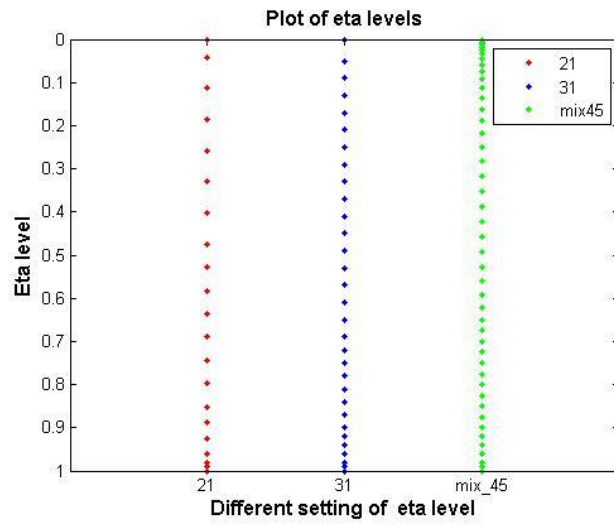


圖 2.1: 巢狀網格設計。

(a)



(b)

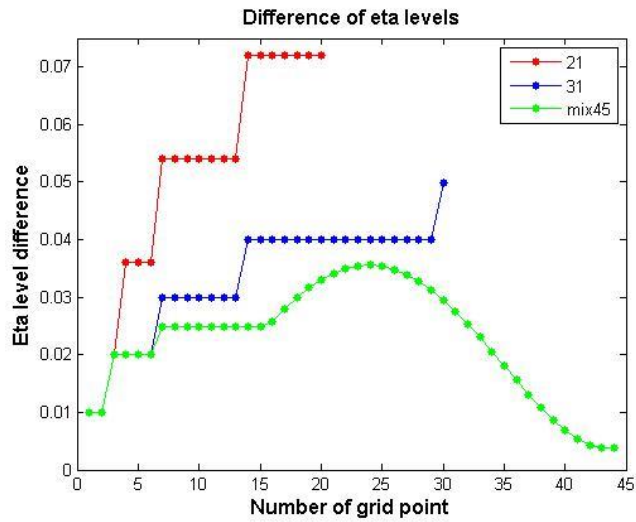


圖 2.2: 實驗二中三組模擬的垂直層 η 值分佈，紅色、藍色、綠色實線分別表示垂直 21、31 和 45 層的模擬，圖(a)水平軸為各組模擬的垂直層數，垂直軸表示三組模擬在垂直方向上的 η 分佈。圖(b)為三組模擬中各層 η 差異，水平軸表示垂直方向上的格點數，垂直軸表示 η 差異。

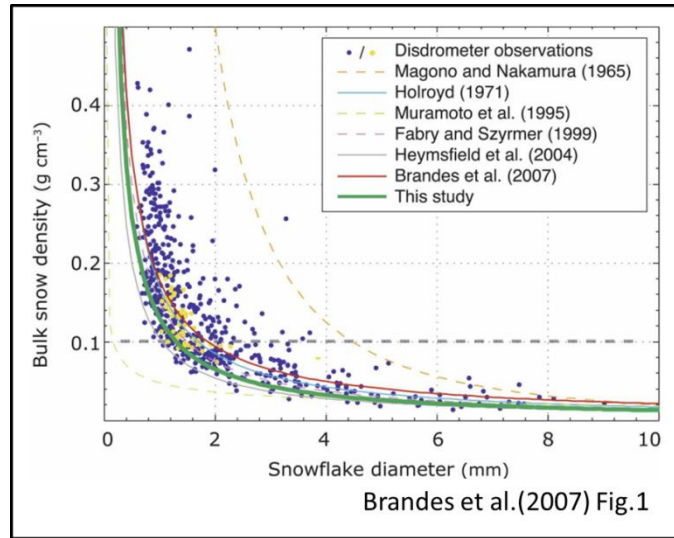
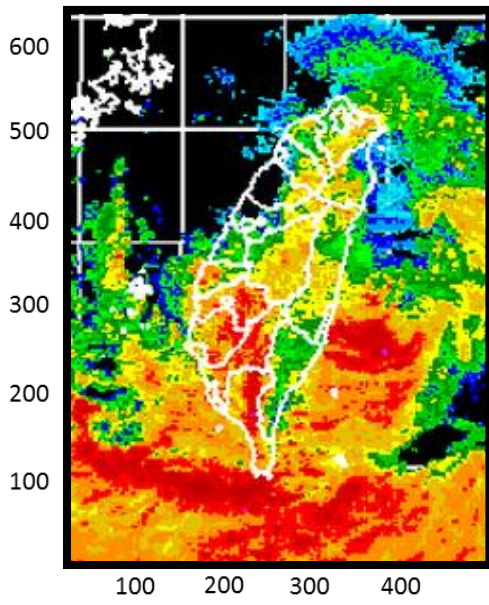
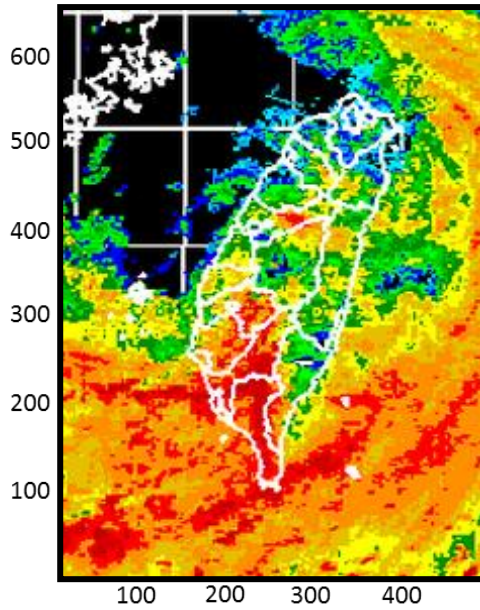


圖 3.1: 即 Brandes et al.(2007)的 Fig.1。水平軸表示雪花粒子的直徑(mm)，垂直軸則表示雪花粒子的總體密度。藍色和黃色點表示觀測降雪事件中雪花粒子的粒徑分佈，圖中每一條線則表示前人研究中描述雪花的粒徑分佈函數，綠色實線為 Thompson 方案中雪花的降冪次分佈函數。

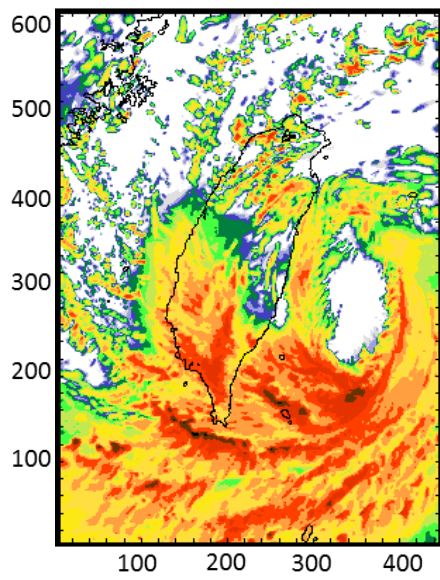
(a) 20090807 12Z OBS



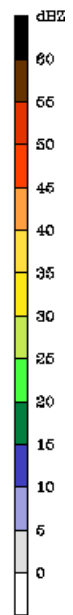
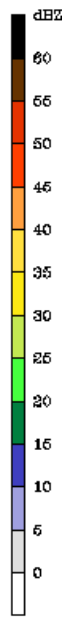
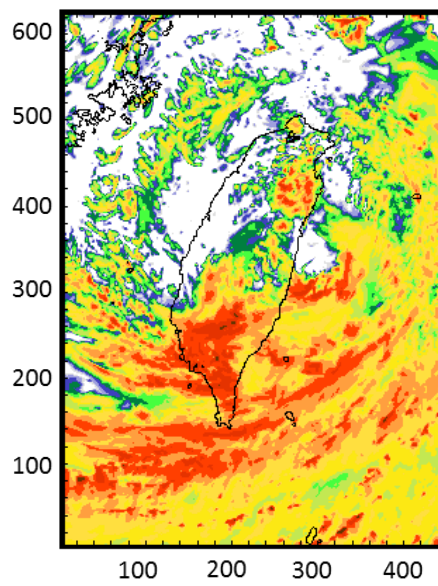
(b) 20090808 00Z OBS



(c) 20090807 12Z WSM6_31



(d) 20090808 00Z WSM6_31



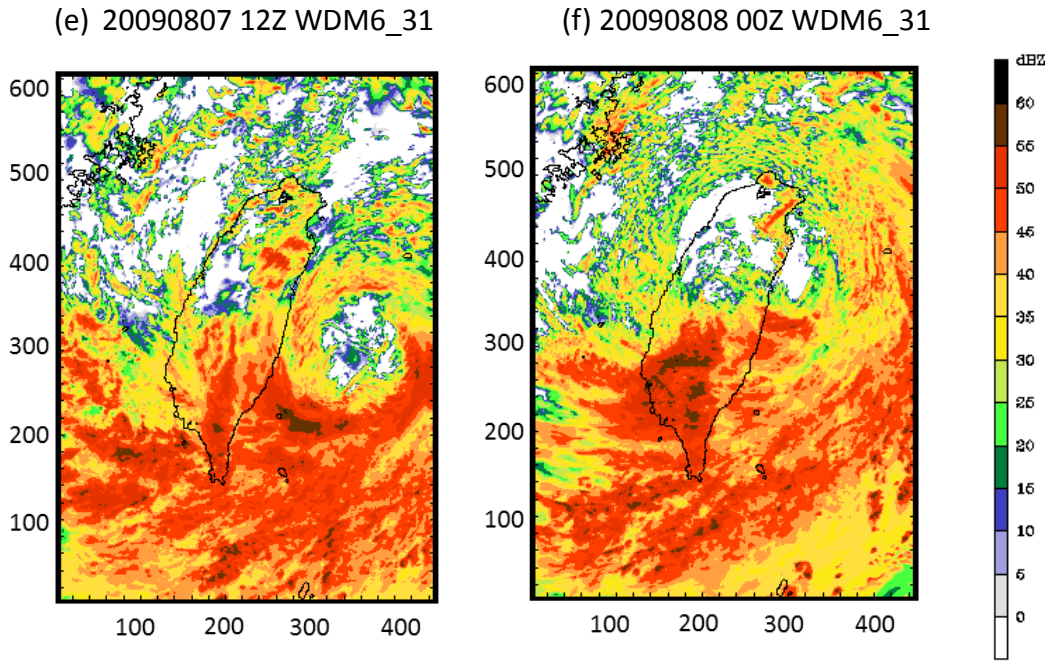
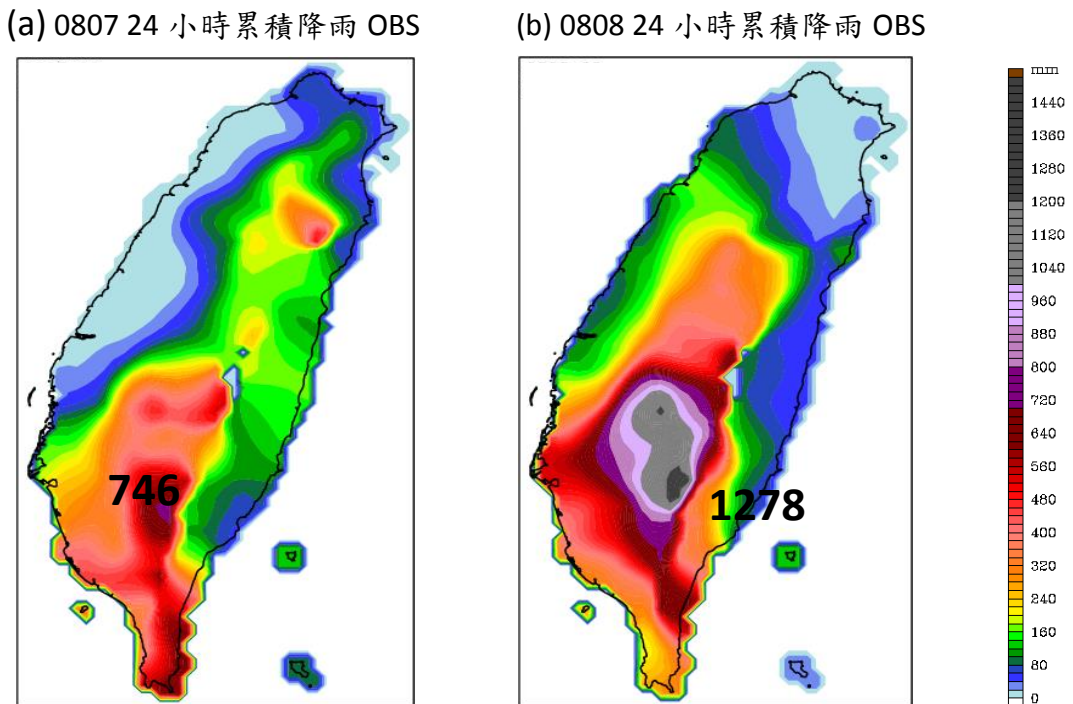
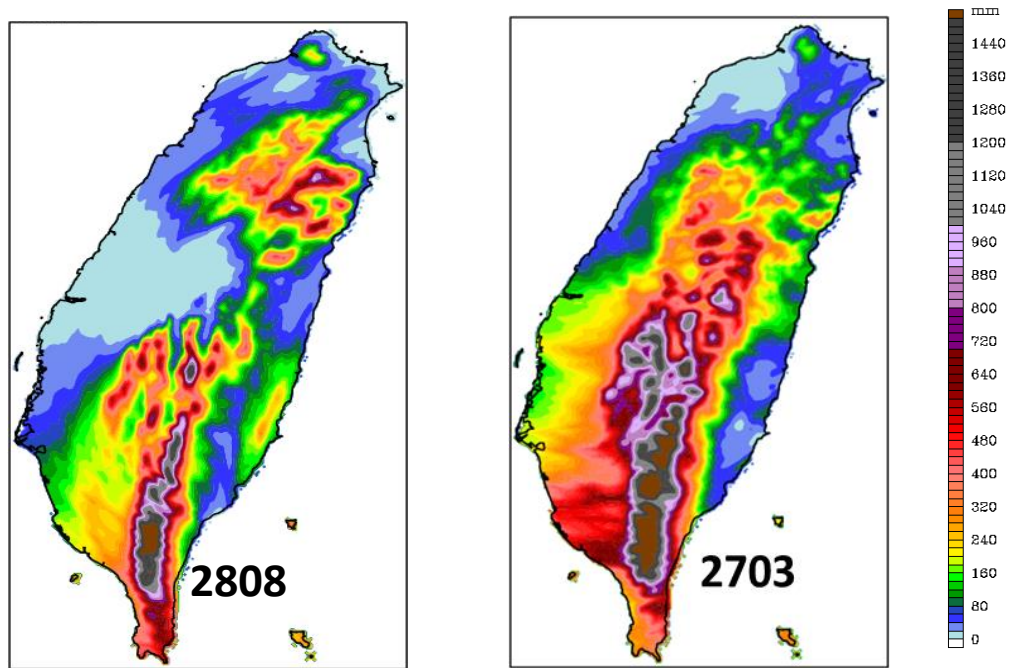


圖 4.1: 觀測與實驗一之雷達最大回波圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)分別為觀測與 WSM6_31 實驗、WDM6_31 實驗模擬結果。圖(a)(c)(e)為 2009 年 8 月 7 日 12Z 時，圖(b)(d)(f)為 2009 年 8 月 8 日 00Z 時。水平軸標示的是距離(km)。



(c) 0807 24 小時累積降雨 WSM6_31 (d) 0808 24 小時累積降雨 WSM6_31



(e) 0807 24 小時累積降雨 WDM6_31 (f) 0808 24 小時累積降雨 WDM6_31

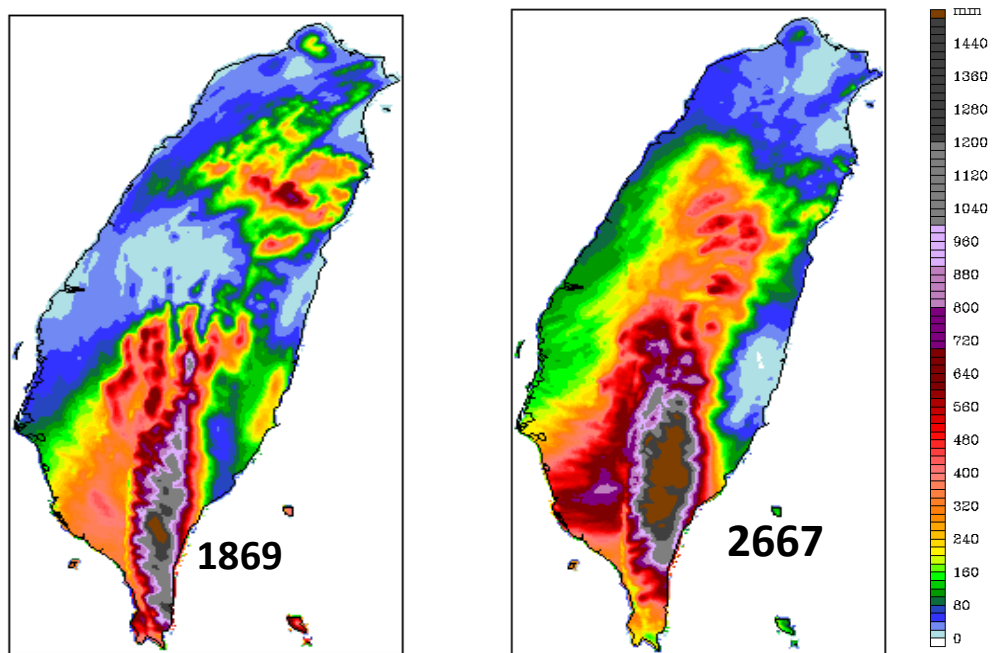
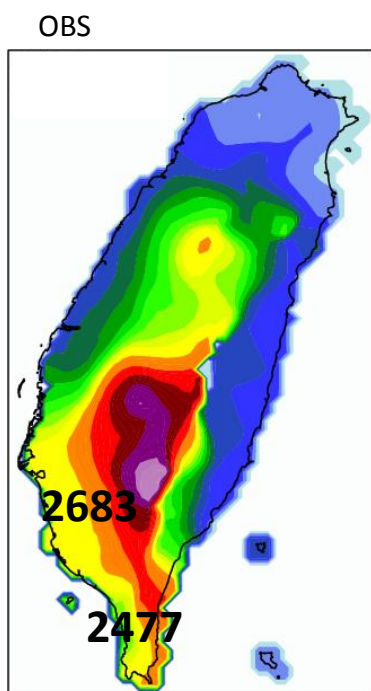
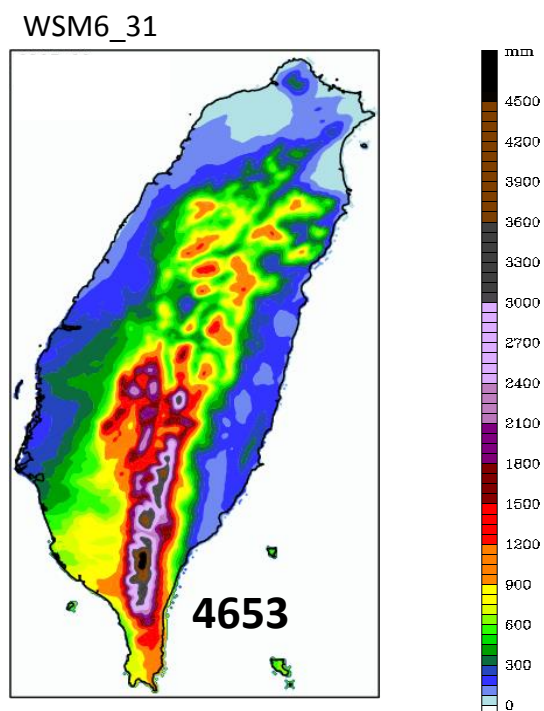


圖 4.2: 觀測與實驗一之 24 小時累積降雨圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)分別為觀測與 WSM6_31 實驗、WDM6_31 實驗結果。圖(a)(c)(e)為 2009 年 8 月 7 日累積雨量圖，圖(b)(d)(f)為 2009 年 8 月 8 日累積雨量圖。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。

(a) 0807-00809 72 小時累積降雨



(b) 0807-00809 72 小時累積降雨



(c) 0807-00809 72 小時累積降雨

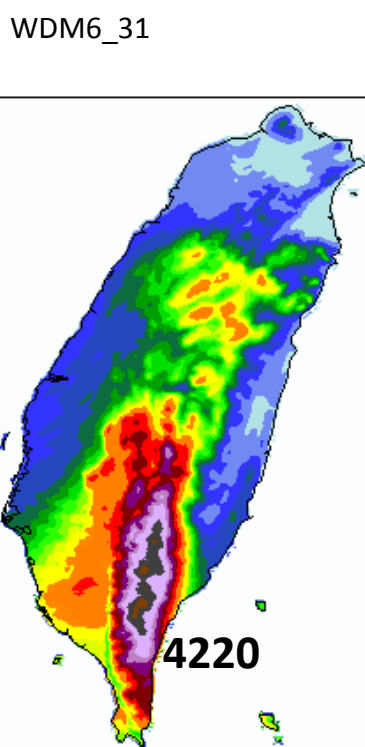


圖 4.3: 觀測與實驗一之 2009 年 8 月 7 日至 8 月 9 日共 72 小時累積降雨圖。圖 (a) 為觀測值，圖 (b) 為 WSM6_31 實驗，圖 (c) 為 WDM6_31 實驗。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。

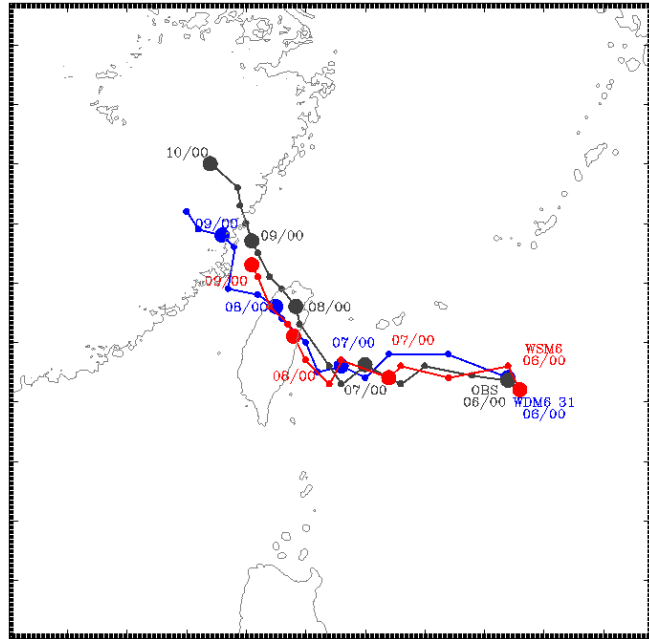


圖 4.4: 觀測(黑色)與實驗一(藍色:WDM6_31、紅色:WSM6_31)模擬颱風路徑。圖上標示的時間為 UTC 時。

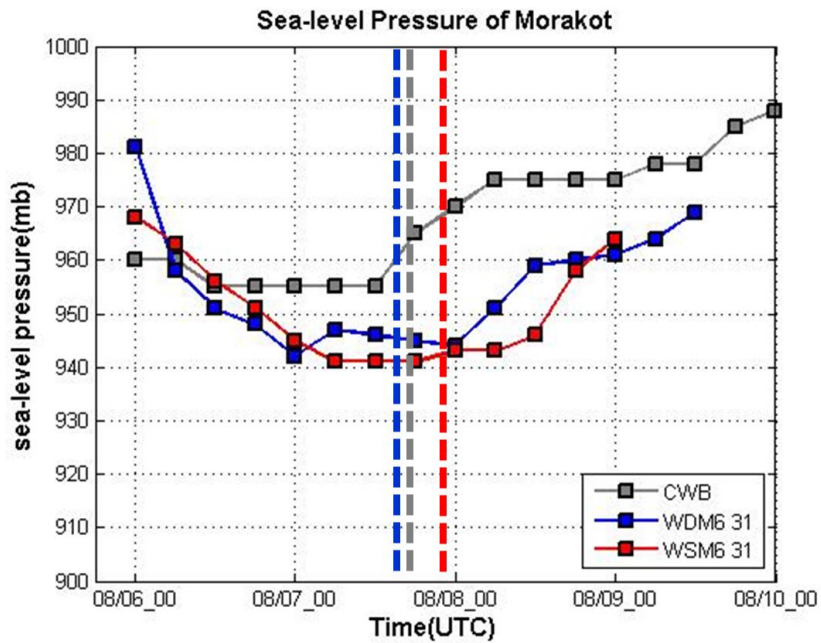


圖 4.5: 觀測(黑色)與實驗一之(藍色:WDM6_31、紅色:WSM6_31)模擬颱風中心氣壓。虛線表示不同的登陸台灣時間。圖上標示的時間為 UTC 時。

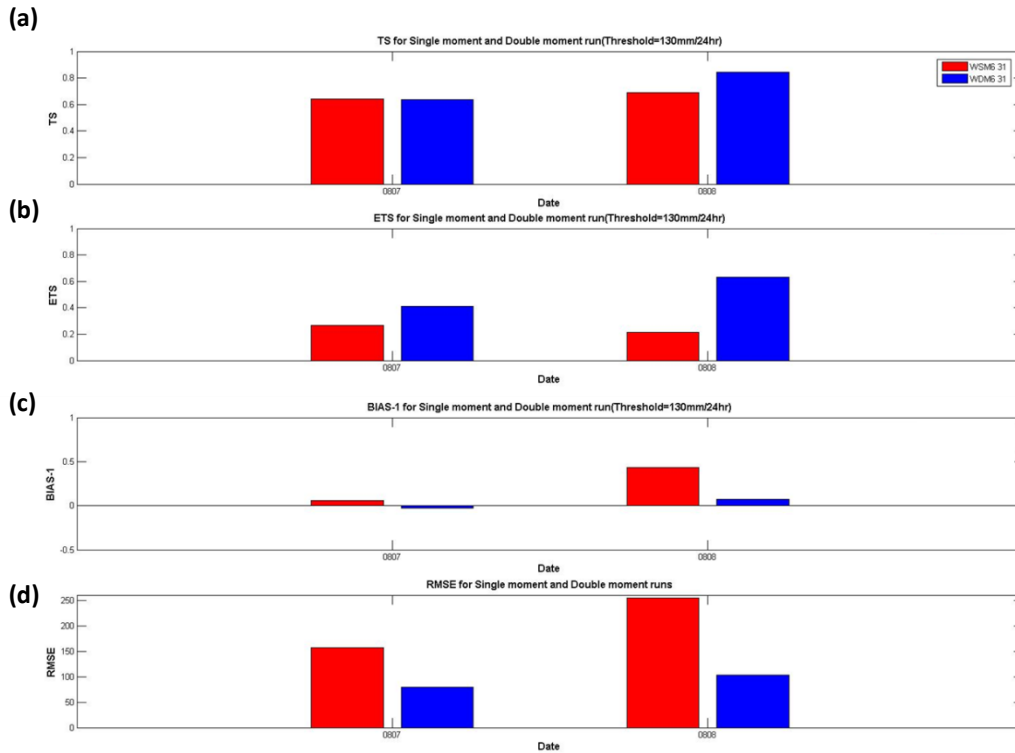


圖 4.6: 實驗一以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為日期，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WSM6_31 實驗，藍色表示 WDM6_31 實驗。

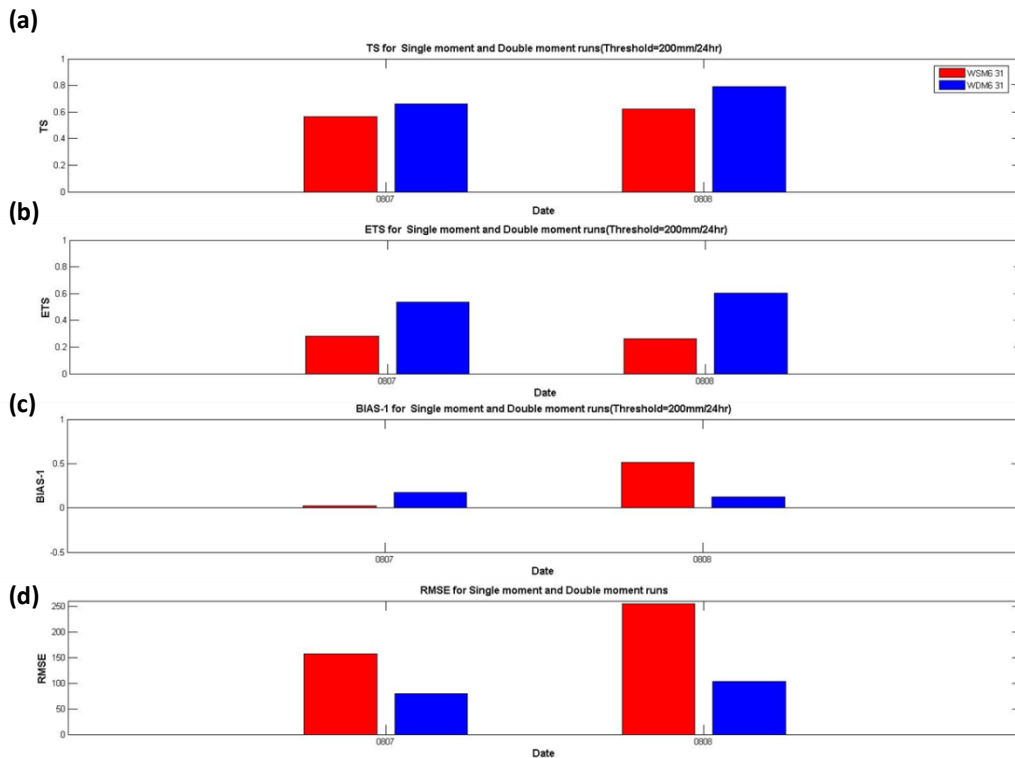


圖 4.7: 實驗一以 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.6。

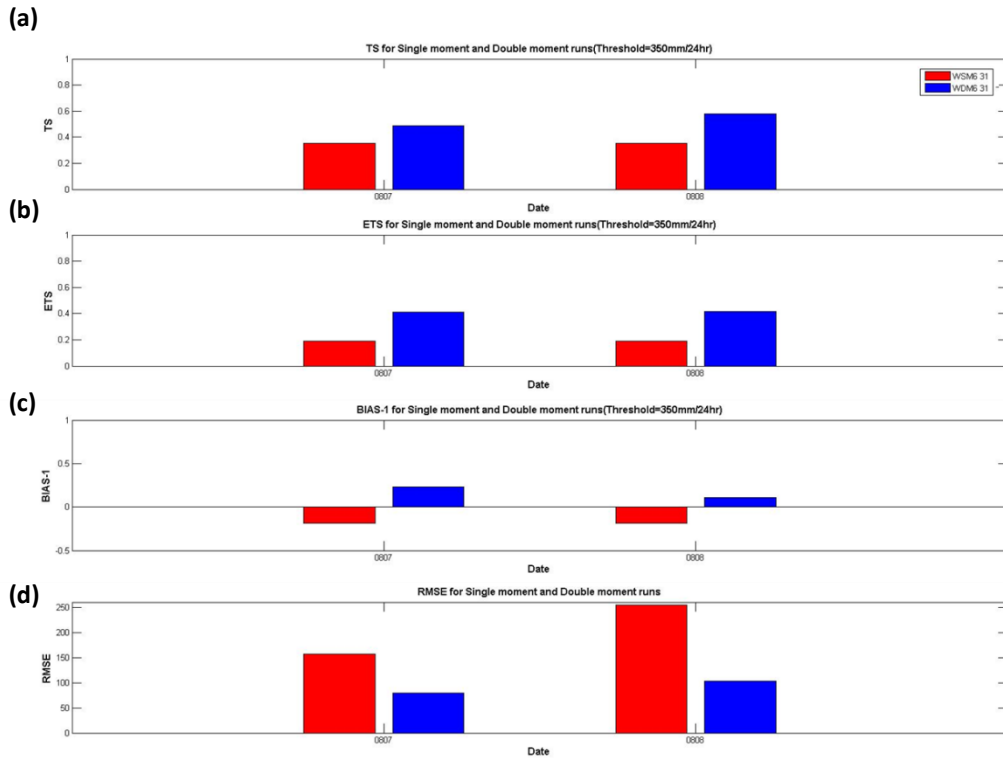


圖 4.8: 實驗一以 24 小時累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.6。

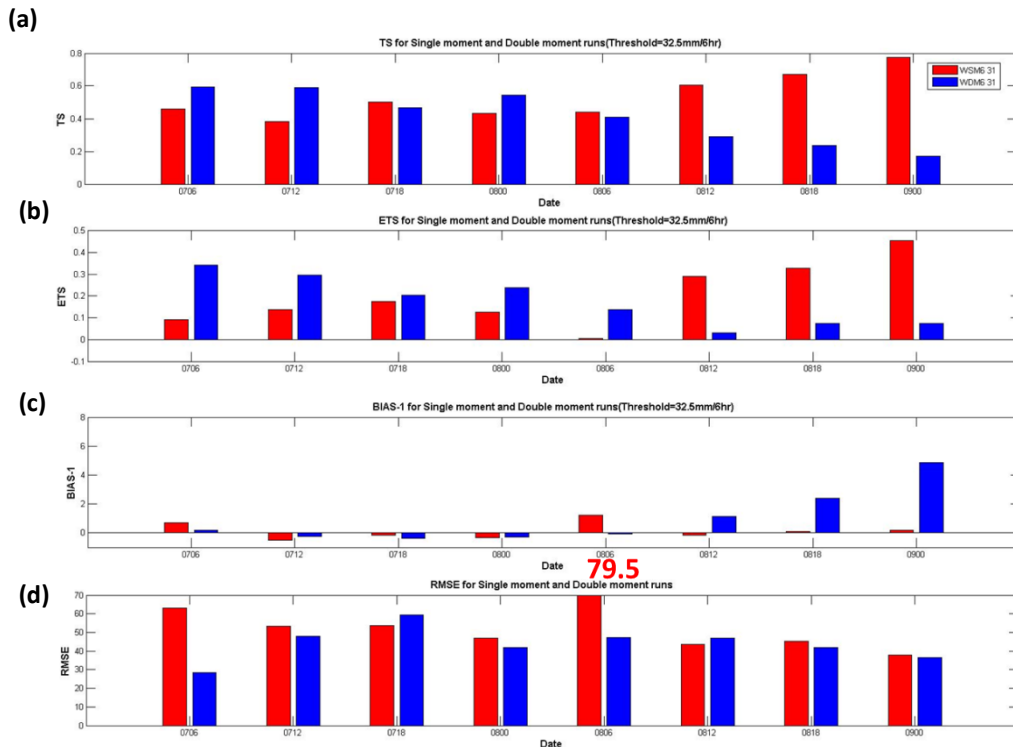


圖 4.9: 實驗一以 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為時間，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WSM6_31 實驗，藍色表示 WDM6_31 實驗。

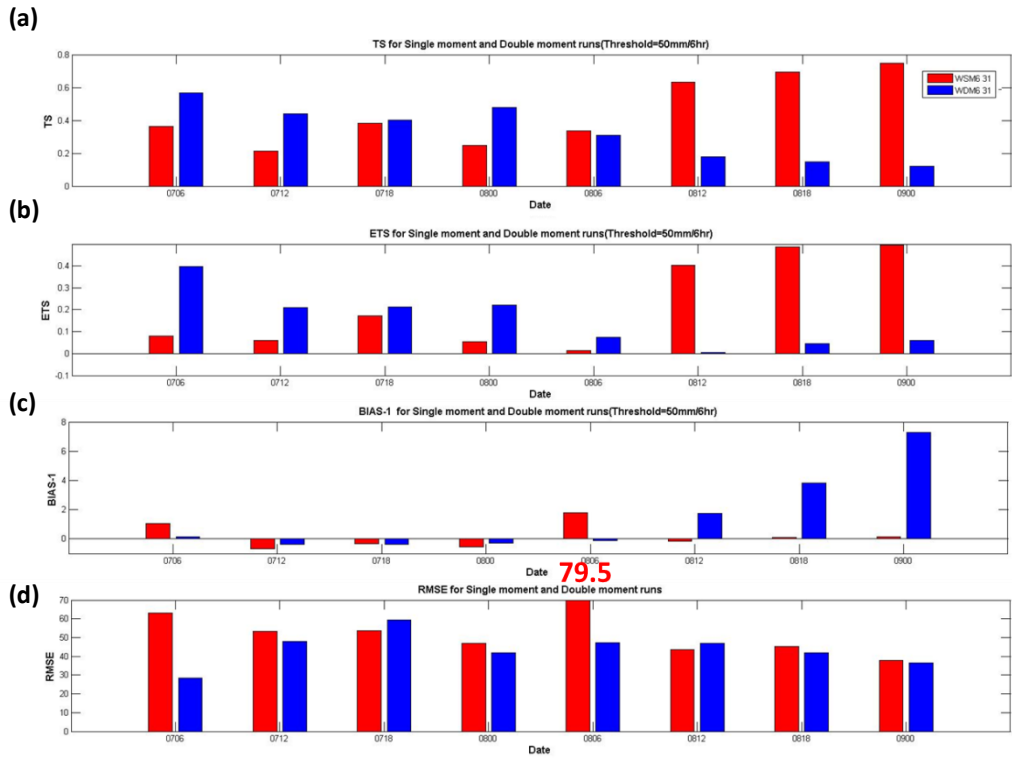


圖 4.10: 實驗一以 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.9。

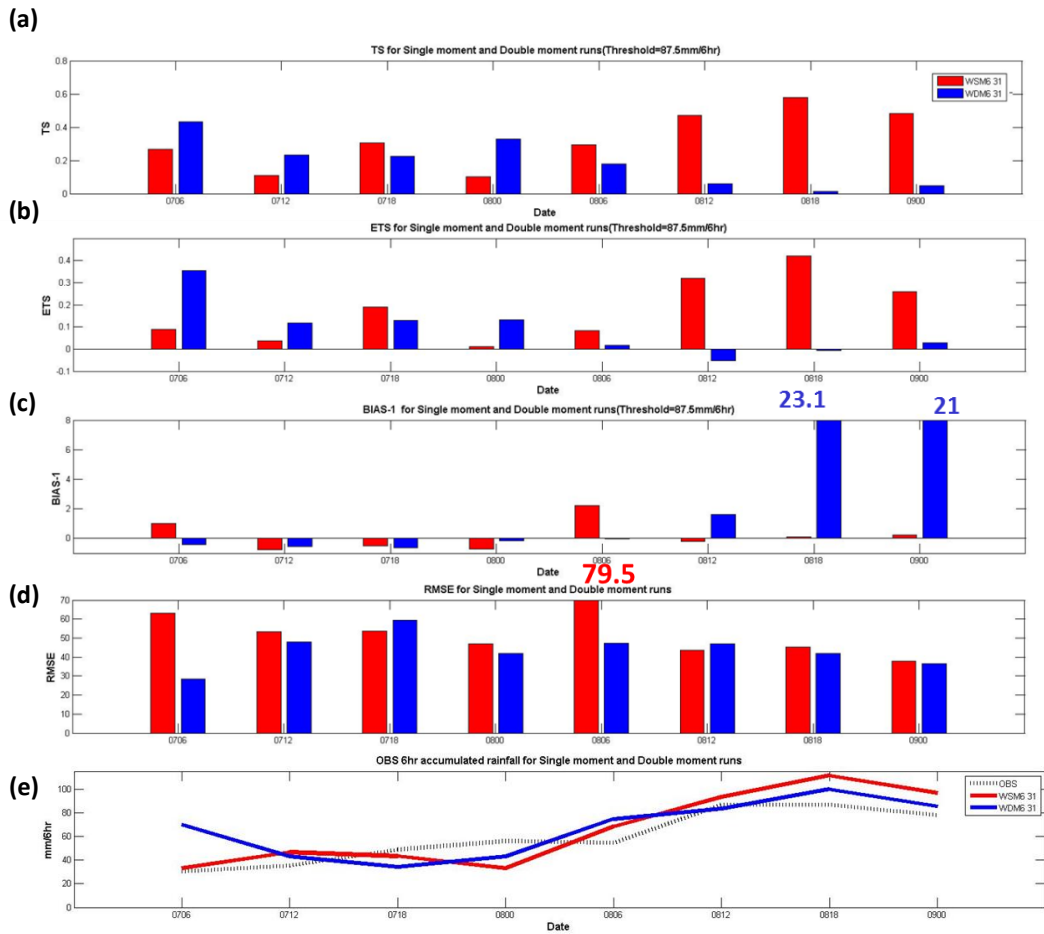
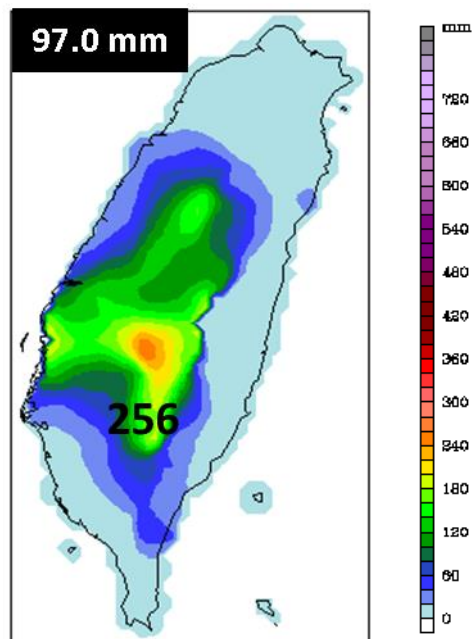
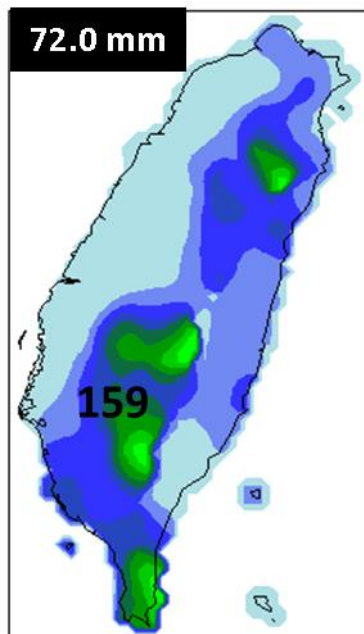


圖 4.11: 實驗一以 6 小時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖(a)-(d)說明同圖 4.9，圖(e)為 399 個觀測站與模擬每 6 小時平均累積降雨量時序圖。

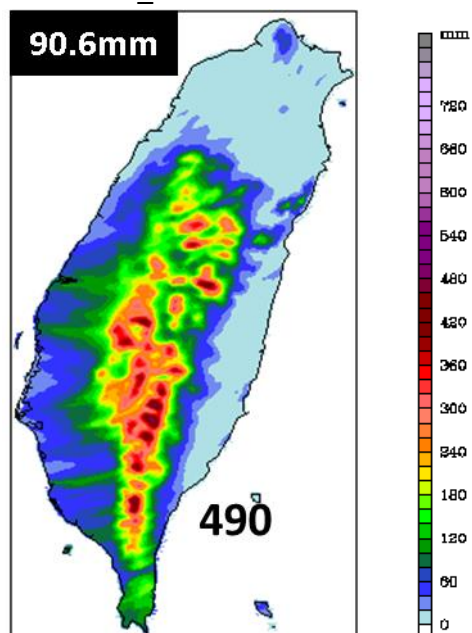
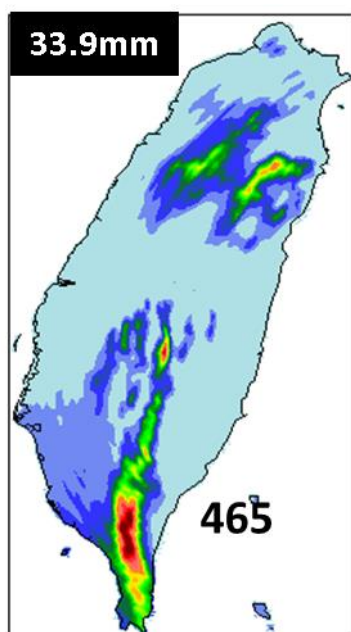
(a) 0807 06Z 6 小時累積降雨 OBS

(b) 0809 00Z 6 小時累積降雨 OBS

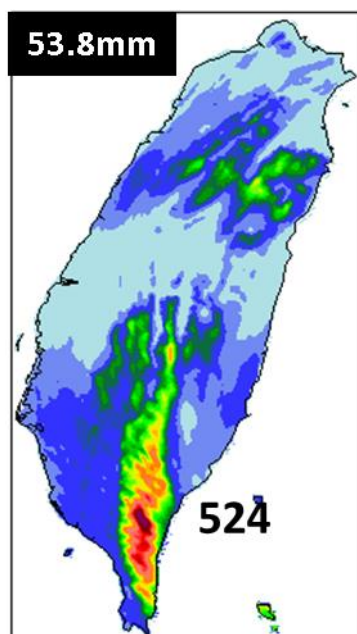


(c) 0807 06Z 6 小時累積降雨
WSM6_31

(d) 0809 00Z 6 小時累積降雨
WSM6_31



(e) 0807 06Z 6 小時累積降雨
WDM6_31



(f) 0809 00Z 6 小時累積降雨
WDM6_31

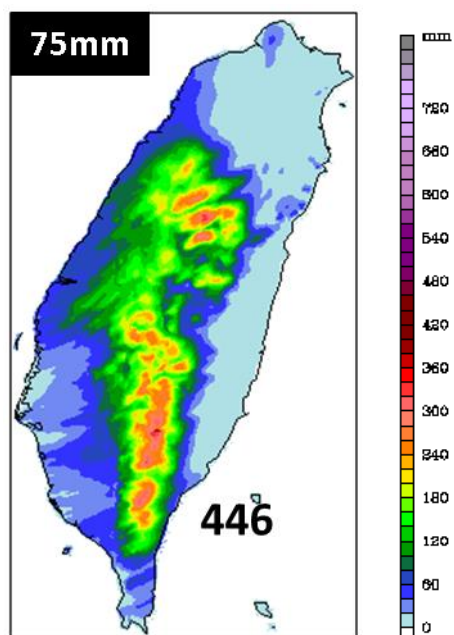
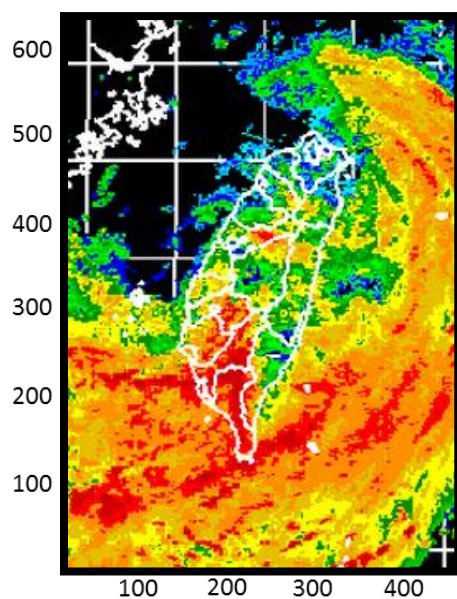
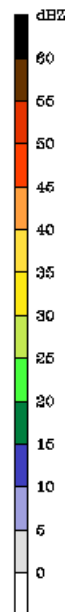
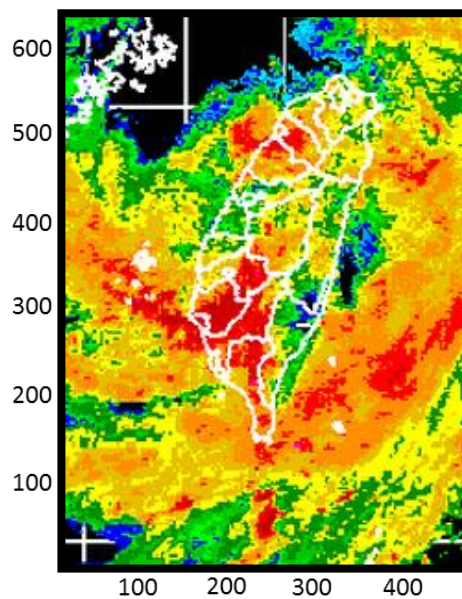


圖 4.12: 觀測與實驗一之 6 小時累積降雨圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)分別為觀測、WSM6_31 實驗和 WDM6_31 實驗。圖(a)(c)(e)為 2009 年 8 月 7 日 06 時，圖(b)(d)(f)為 2009 年 8 月 9 日 00 時。圖中黑色框框內數字為陸地上 6 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。

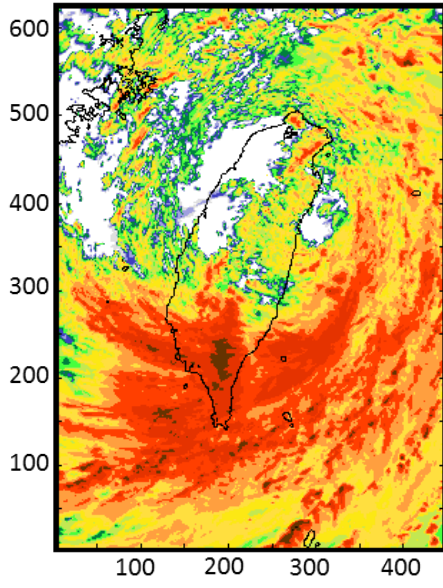
(a) 20090808 00Z OBS



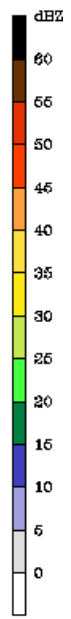
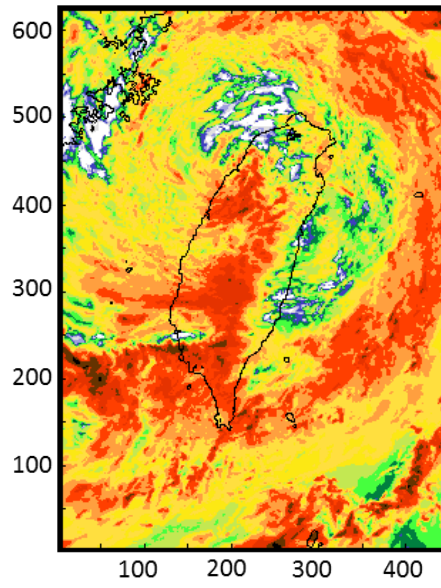
(b) 20090808 12Z OBS



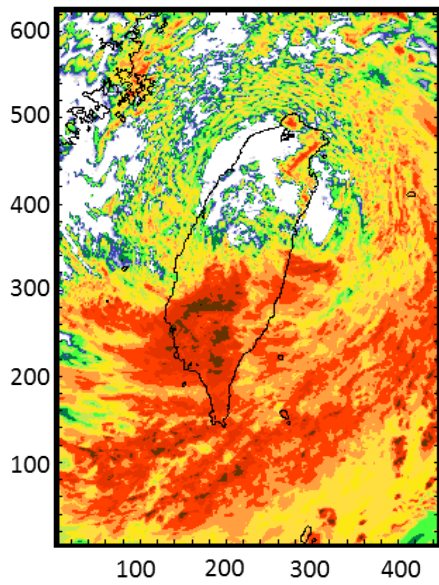
(c) 20090808 00Z WDM6_21



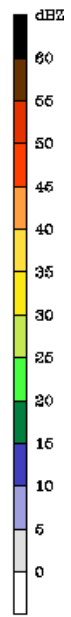
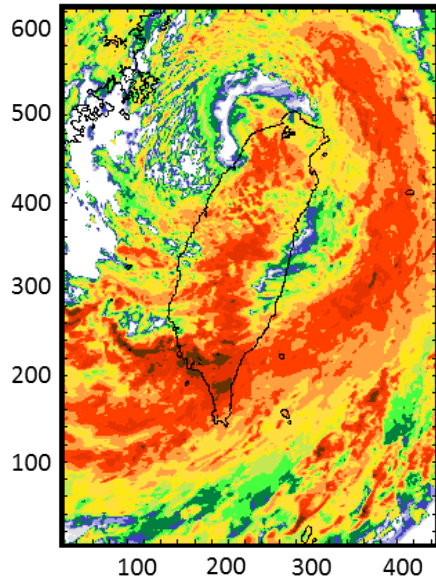
(d) 20090808 12Z WDM6_21



(e) 20090808 00Z WDM6_31



(f) 20090808 12Z WDM6_31



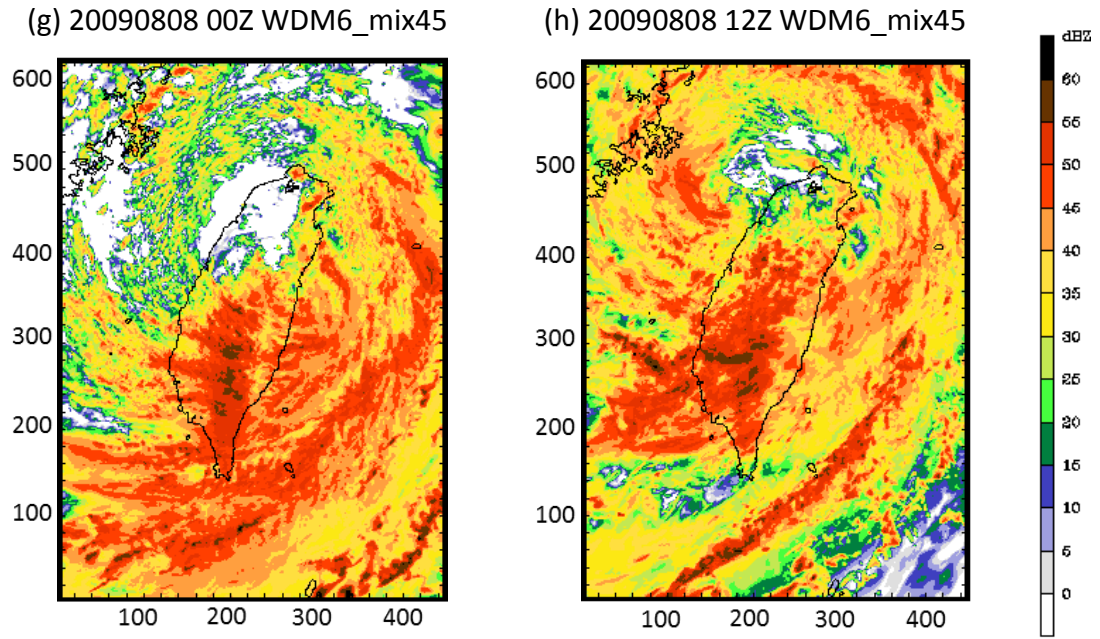
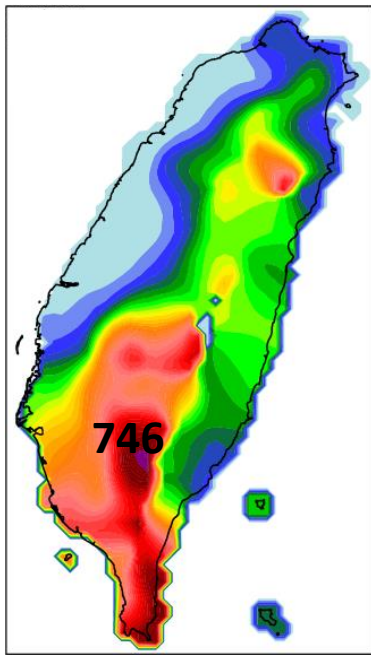
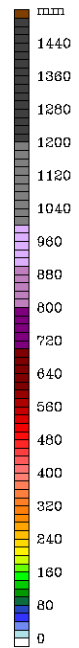
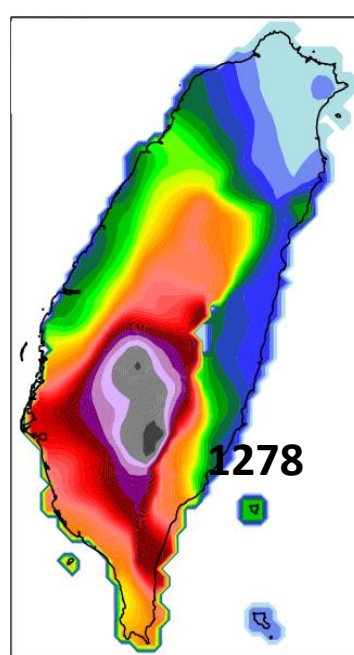


圖 4.13: 觀測與實驗二模擬之雷達最大回波圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)分別為觀測、WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。圖(a)(c)(e)(g)為 2009 年 8 月 8 日 00Z 時，圖(b)(d)(f)(h)為 2009 年 8 月 8 日 12Z 時。水平軸標示的是距離(km)。

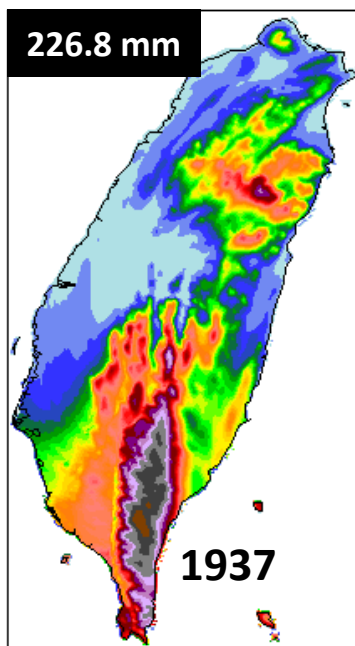
(a) 0807 24 小時累積降雨 OBS



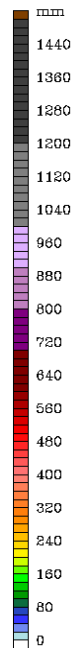
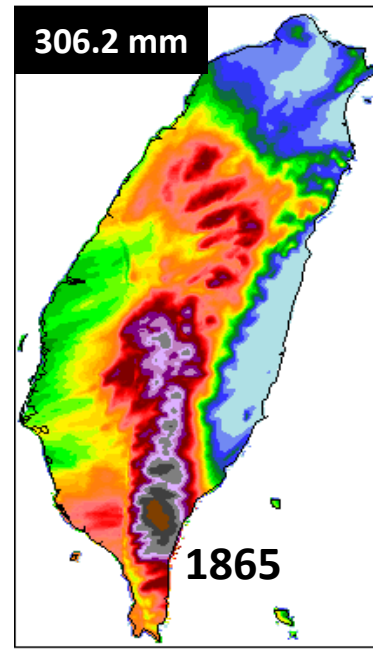
(b) 0808 24 小時累積降雨 OBS



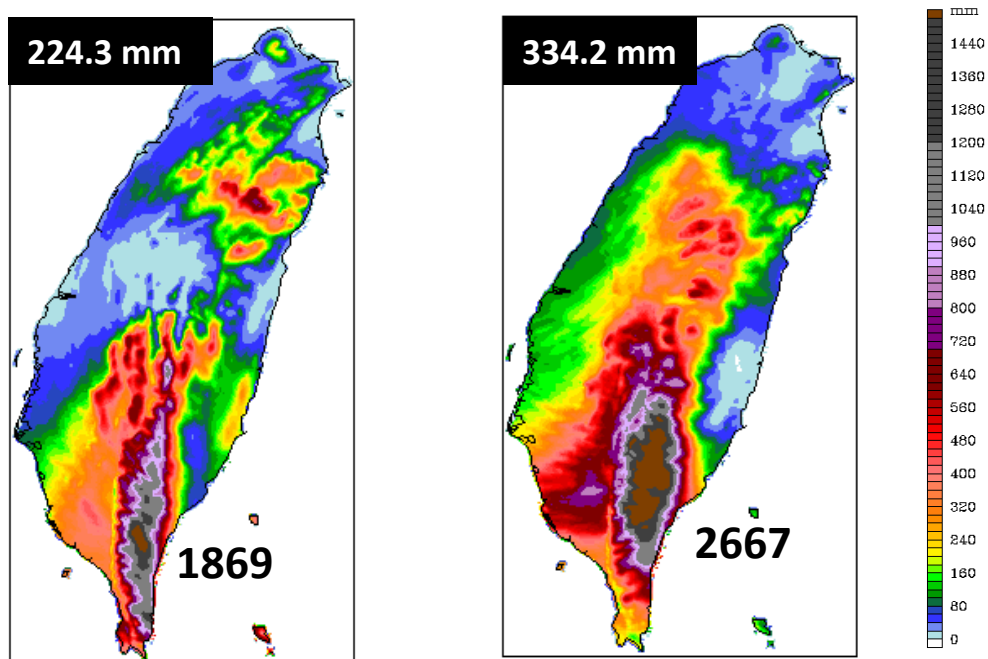
(c) 0807 24 小時累積降雨 WDM6_21



(d) 0808 24 小時累積降雨 WDM6_21



(e) 0807 24 小時累積降雨 WDM6_31 (f) 0808 24 小時累積降雨 WDM6_31



(g) 0807 24 小時累積降雨 WDM6_mix45 (h) 0808 24 小時累積降雨 WDM6_mix45

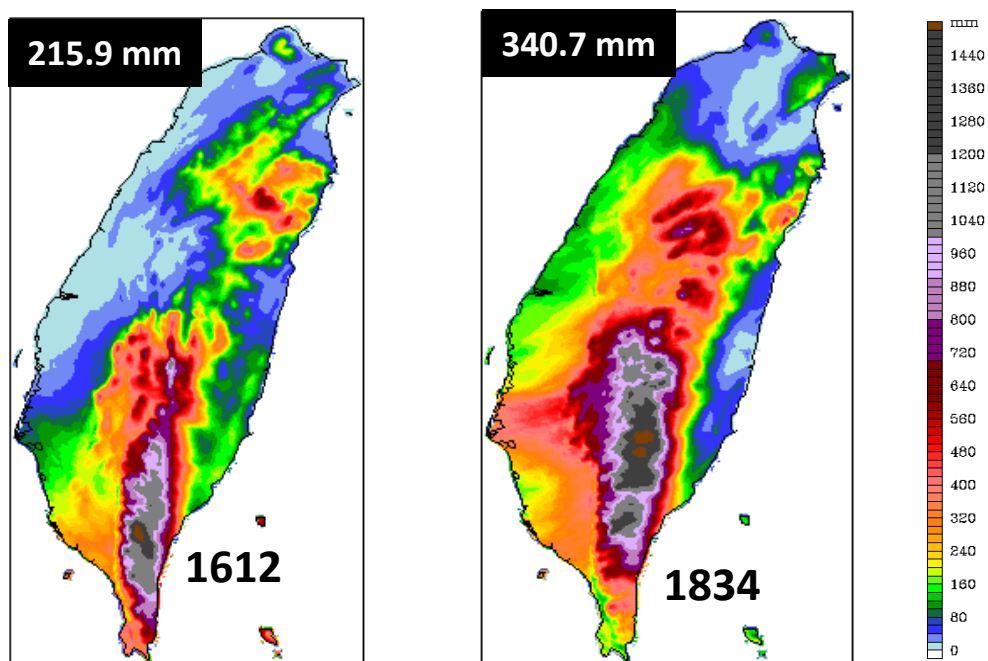
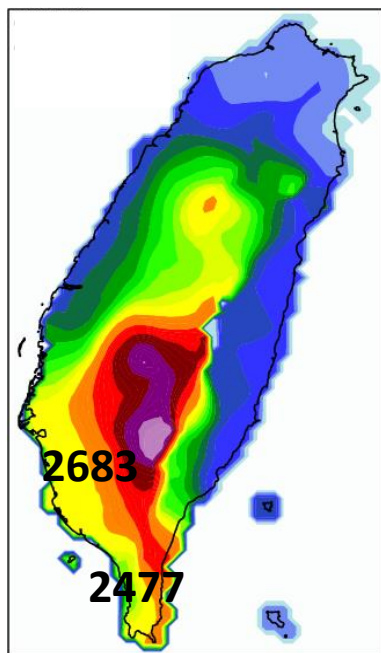


圖 4.14: 觀測與實驗二之 24 小時累積降雨圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)分別為觀測、WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。圖(a)(c)(e)(g)為 2009 年 8 月 7 日累積雨量圖，圖(b)(d)(f)(h)為 2009 年 8 月 8 日累積雨量圖。圖中黑色框框為陸地上 24 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值 (mm)。

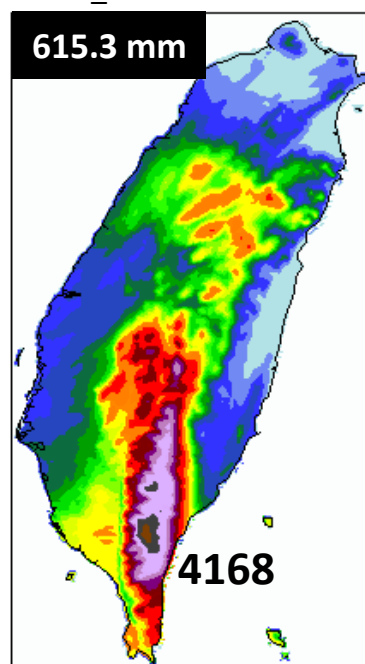
(a) 0807-00809 72 小時累積降雨

OBS



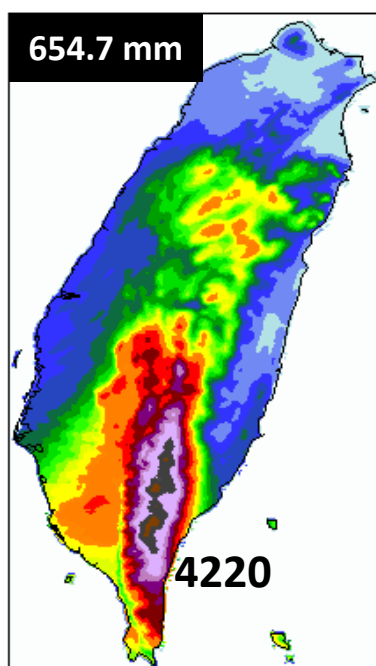
(b) 0807-00809 72 小時累積降雨

WDM6_21



(c) 0807-00809 72 小時累積降雨

WDM6_31



(d) 0807-00809 72 小時累積降雨

WDM6_mix45

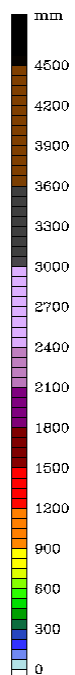
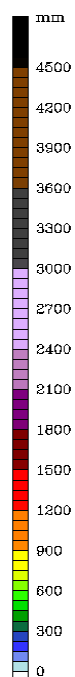
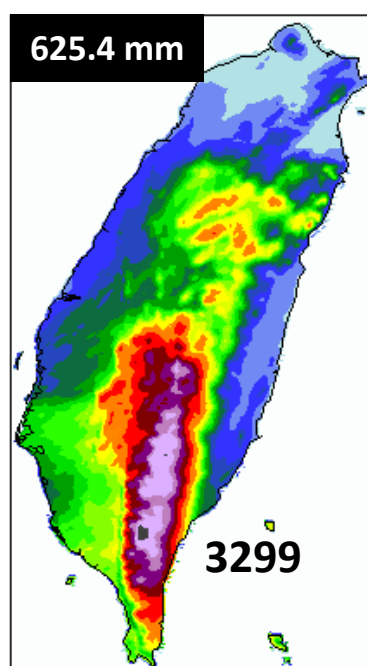


圖 4.15: 觀測與實驗二之 2009 年 8 月 7 日至 8 月 9 日共 72 小時累積降雨圖。圖 (a) 為觀測值，圖 (b) 為 WDM6_21 實驗，圖 (c) 為 WDM6_31 實驗，圖 (d) 為 WDM6_mix45 實驗。圖中左上角黑色框框為陸地上 24 小時平均累積雨量，圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。

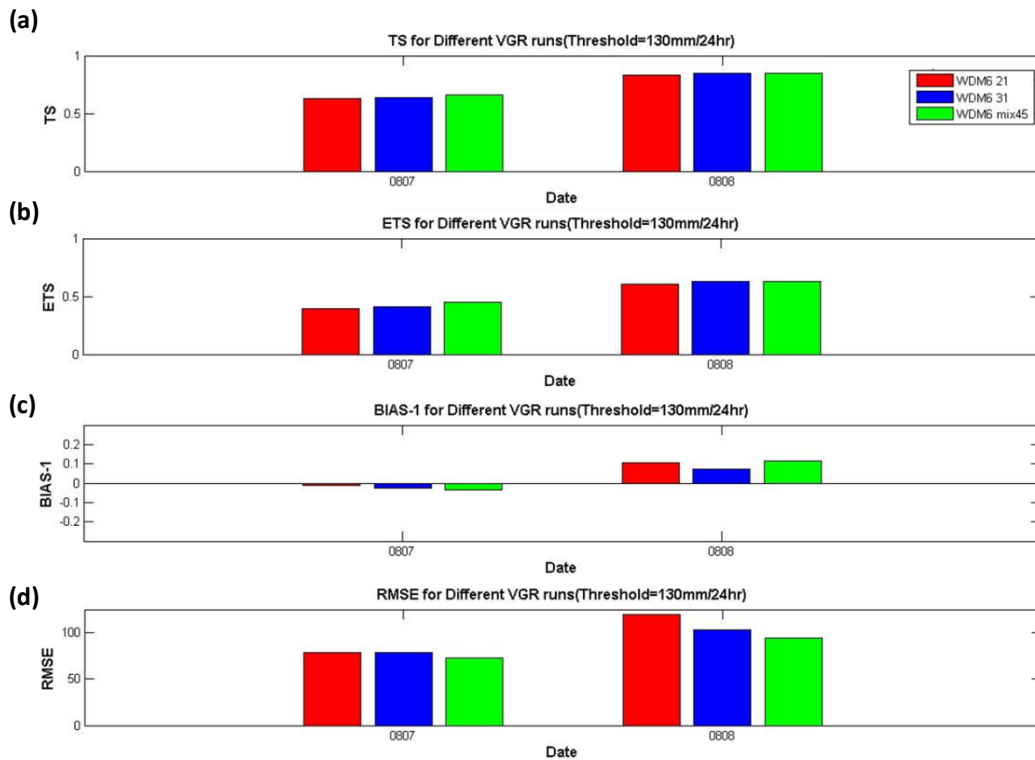


圖 4.16: 實驗二以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為日期，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅色表示 WDM6_21 實驗，藍色表示 WDM6_31 實驗，綠色表示 WDM6_mix45 實驗。

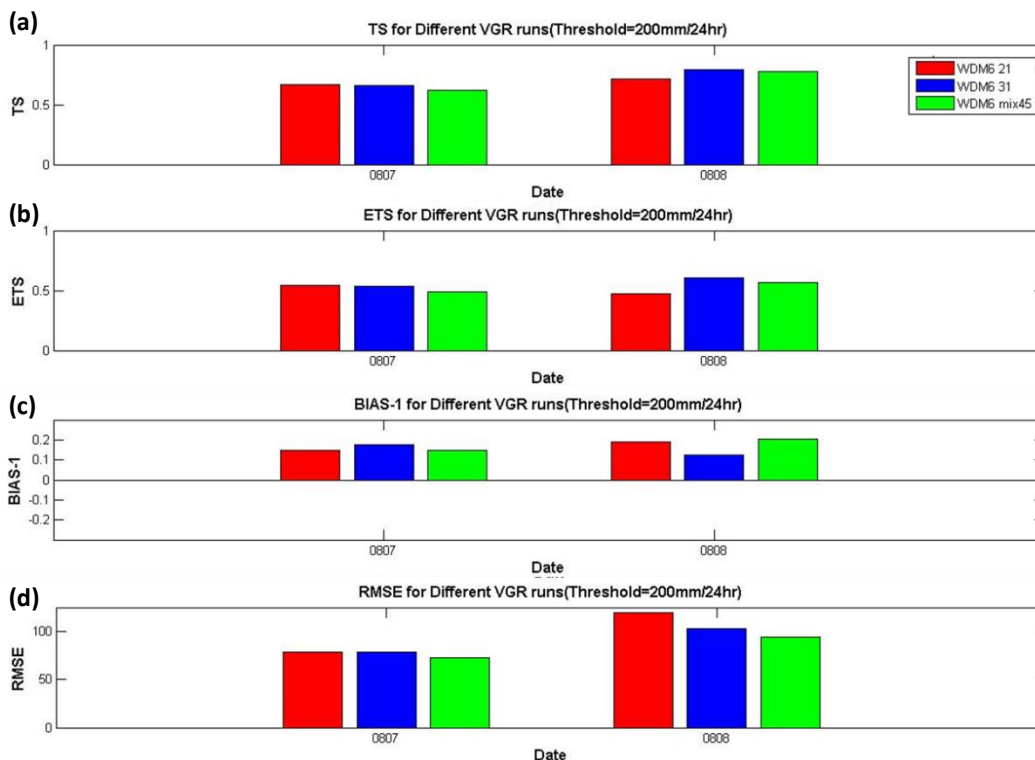


圖 4.17: 實驗二以 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.16。

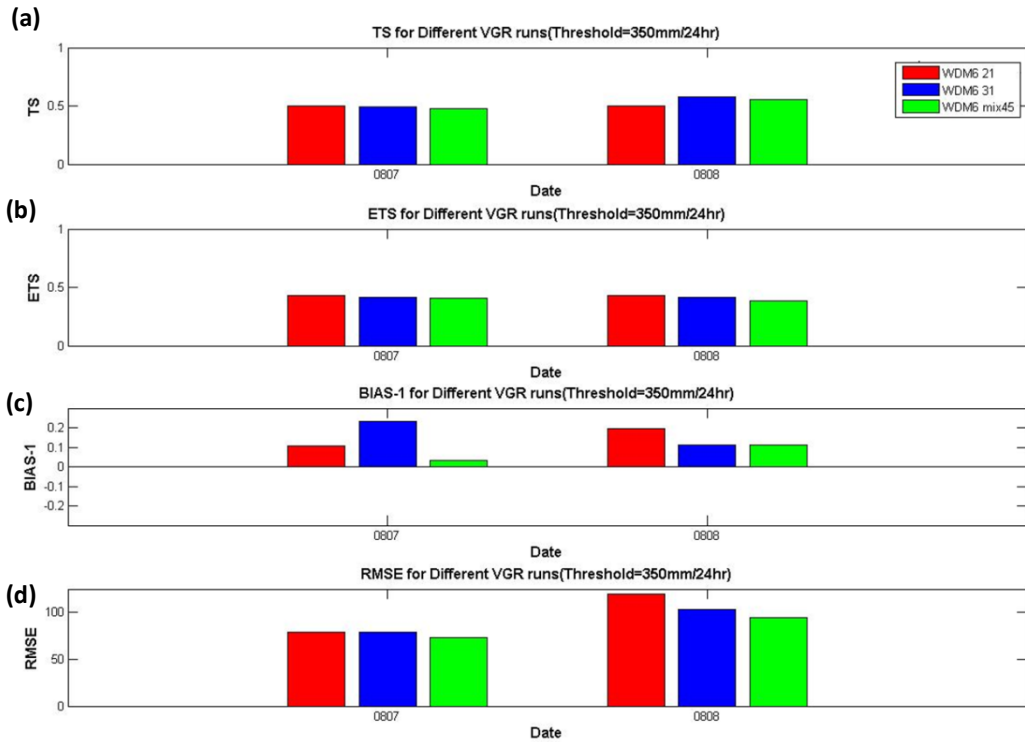


圖 4.18: 實驗二以 24 小時累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.16。

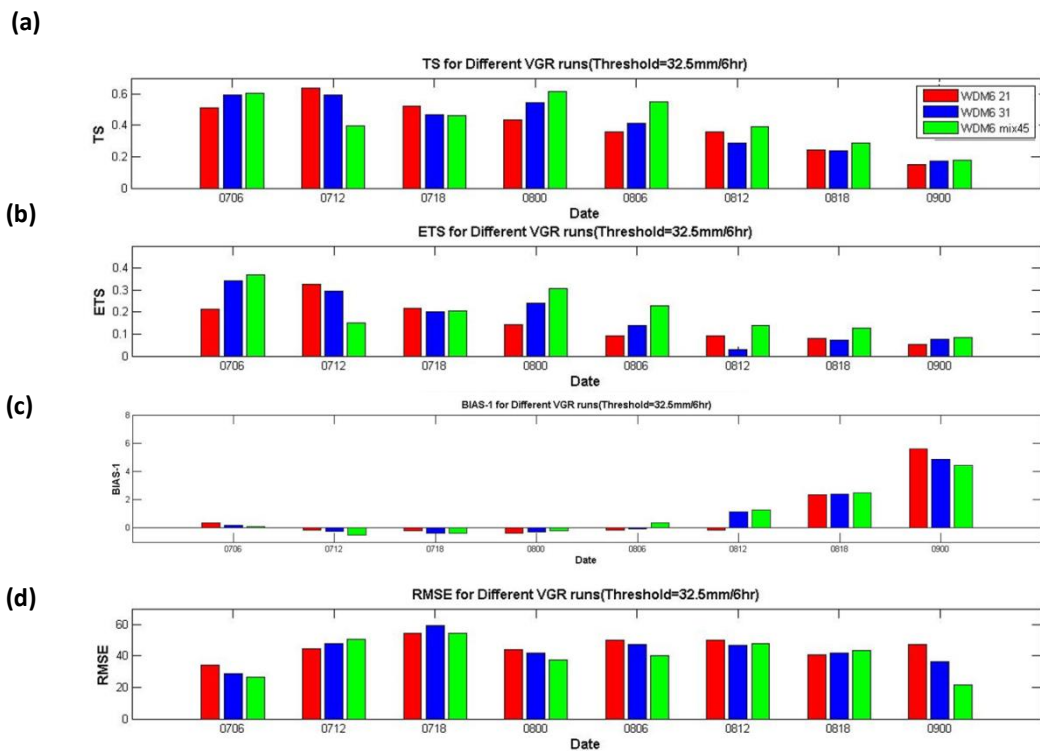
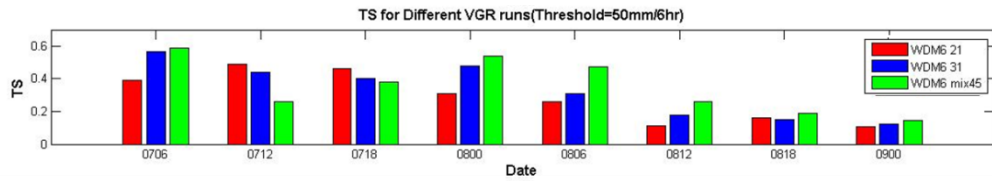


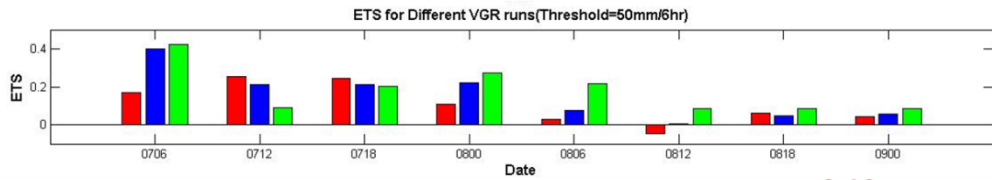
圖 4.19: 實驗二以 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為時間，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中紅

色表示 WDM6_21 實驗，藍色表示 WDM6_31 實驗，綠色表示 WDM6_mix45 實驗。

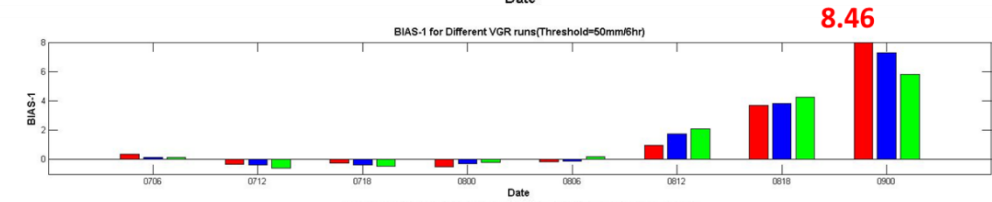
(a)



(b)



(c)



(d)

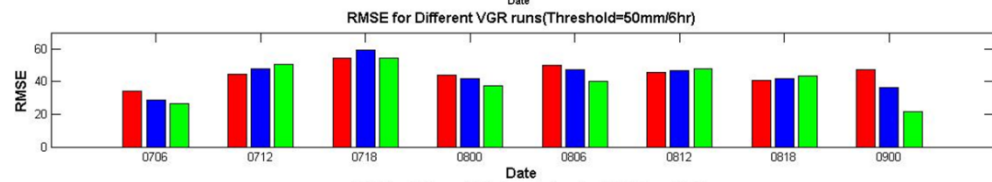
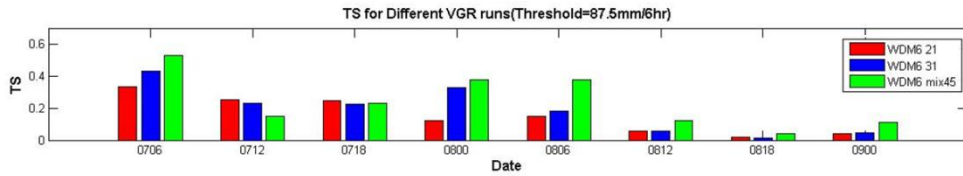
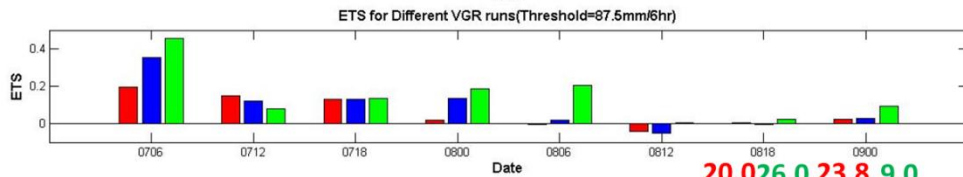


圖 4.20: 實驗二以 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.19。

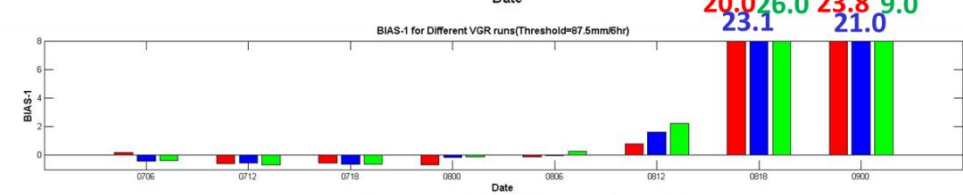
(a)



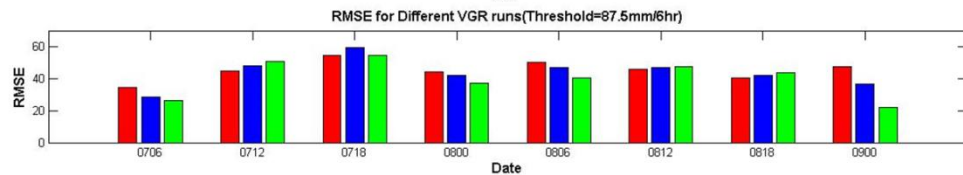
(b)



(c)



(d)



(e)

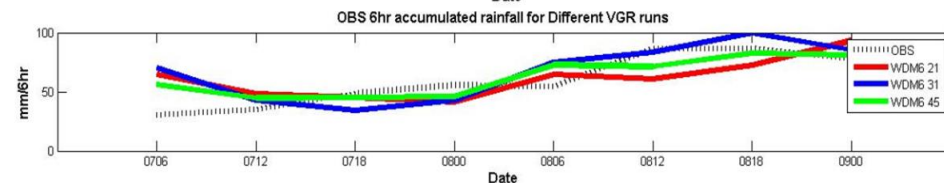
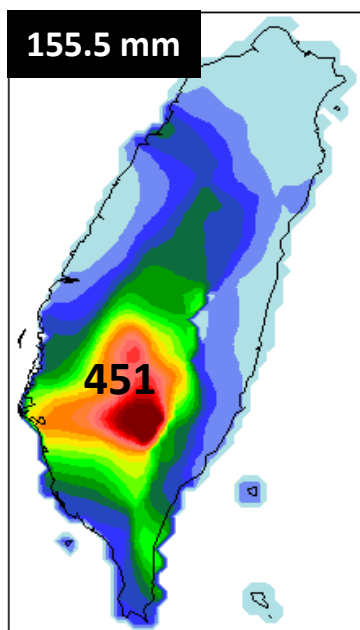
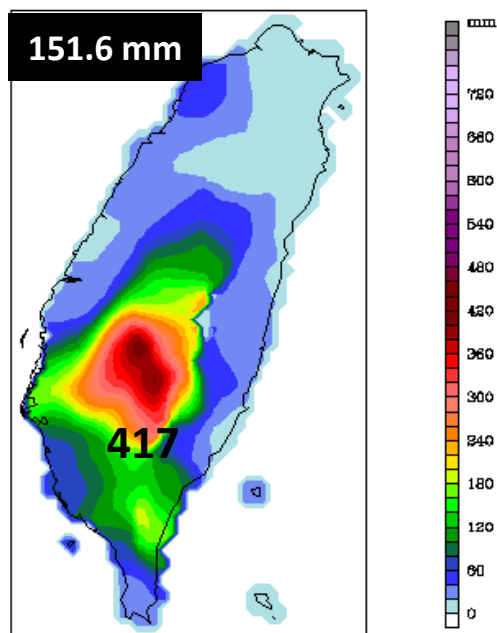


圖 4.21: 實驗二以 6 小時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖(a)-(d)說明同圖 4.19，圖(e)為 399 個觀測站與模擬每 6 小時平均累積降雨量時序圖。

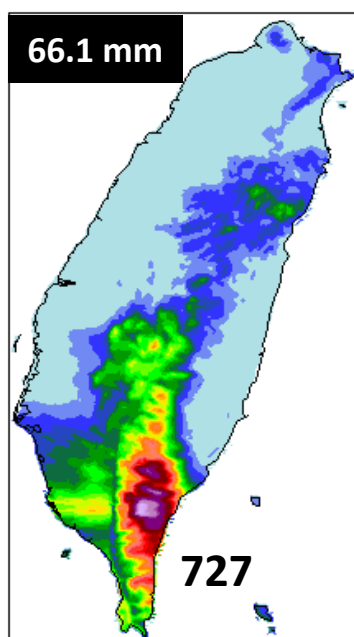
(b) 0808 06Z 6 小時累積降雨 OBS



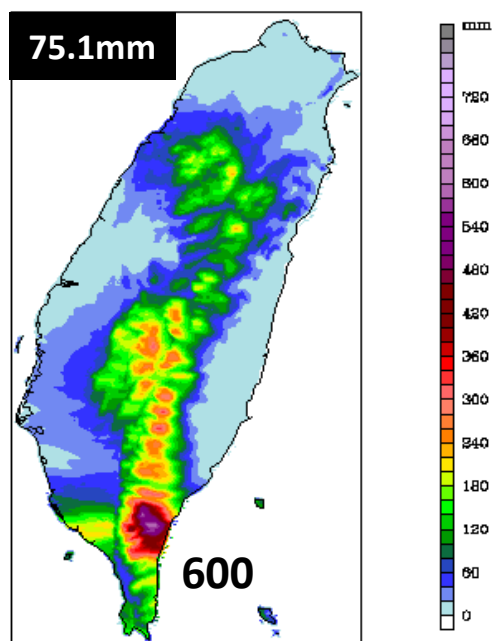
(b) 0808 12Z 6 小時累積降雨 OBS



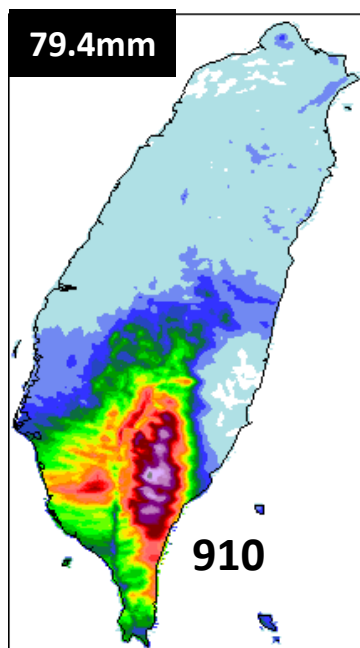
(c) 0808 06Z 6 小時累積降雨
WDM6_21



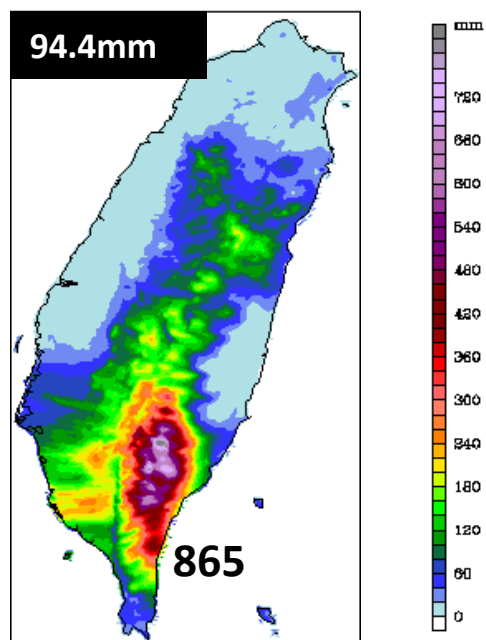
(d) 0808 12Z 6 小時累積降雨
WDM6_21



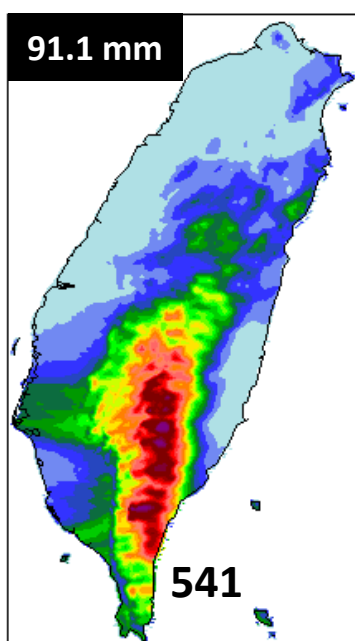
(e) 0808 06Z 6 小時累積降雨
WDM6_31



(f) 0808 12Z 6 小時累積降雨
WDM6_31



(g) 0808 06Z 6 小時累積降雨
WDM6_mix45



(h) 0808 12Z 6 小時累積降雨
WDM6_mix45

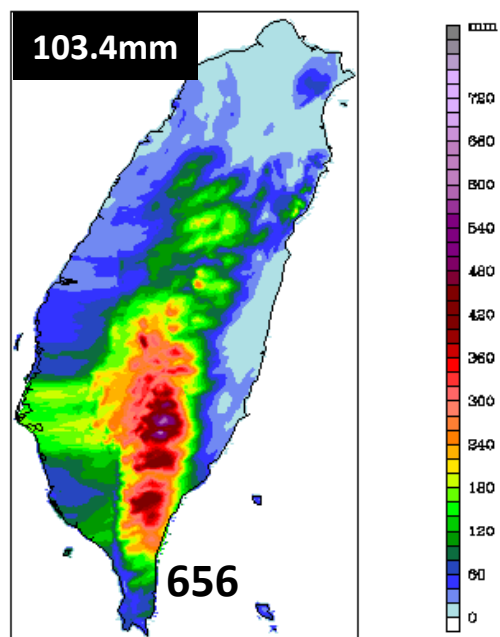
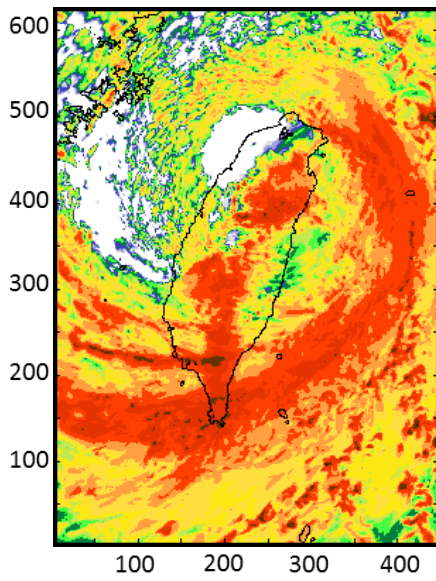
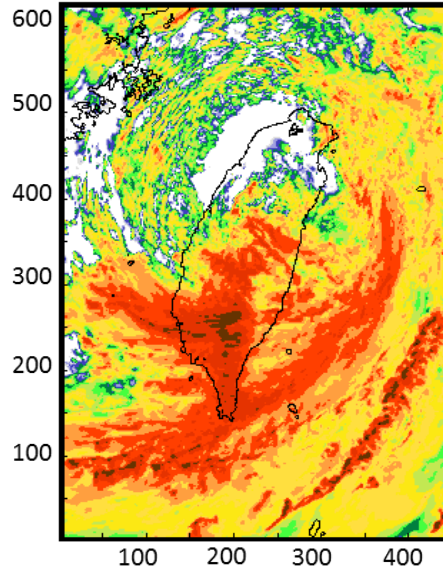


圖 4.22: 觀測與實驗二之 6 小時累積降雨圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)分別為觀測、WDM6_21 實驗、WDM6_31 實驗和 WDM6_mix45 實驗。圖(a)(c)(e)(g)為 2009 年 8 月 8 日 06 時，圖(b)(d)(f)(h)為 2009 年 8 月 8 日 12 時。圖中黑色框框內數字為陸地上 6 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。

(a) 20090808 06Z WDM6_21



(b) 20090808 06Z WDM6_31



(c) 20090808 06Z WDM6_mix45

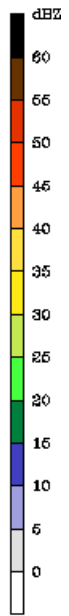
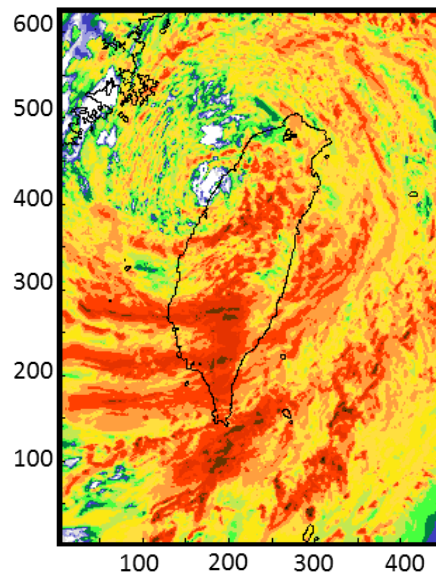


圖 4.23: 實驗二 2009 年 8 月 8 日 06Z 之雷達最大回波圖，圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21 實驗、WDM6_31 實驗與 WDM6_mix45 實驗結果。水平軸標示的是距離(km)。

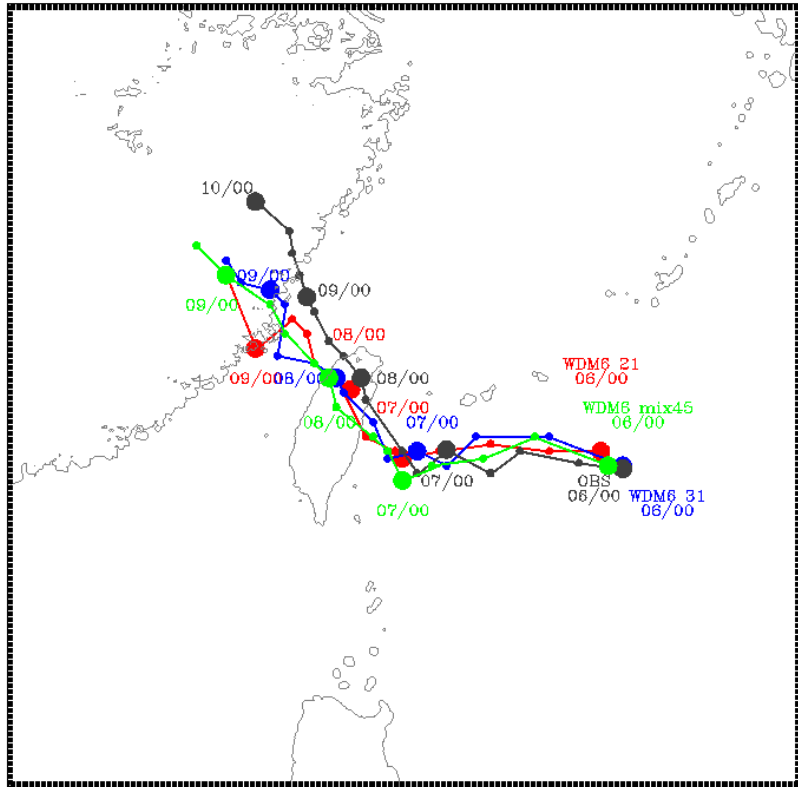


圖 4.24: 觀測(黑色)與實驗二之(紅色:WDM6_21、藍色:WDM6_31、綠色:WDM6_mix45)模擬颱風路徑圖。圖上標示的時間為 UTC 時。

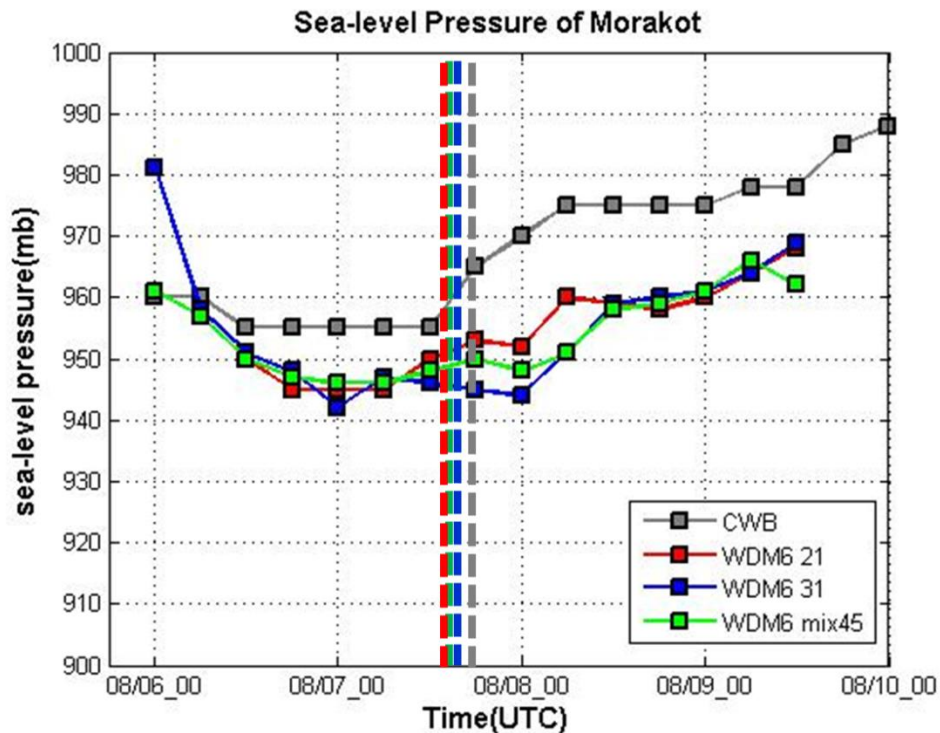
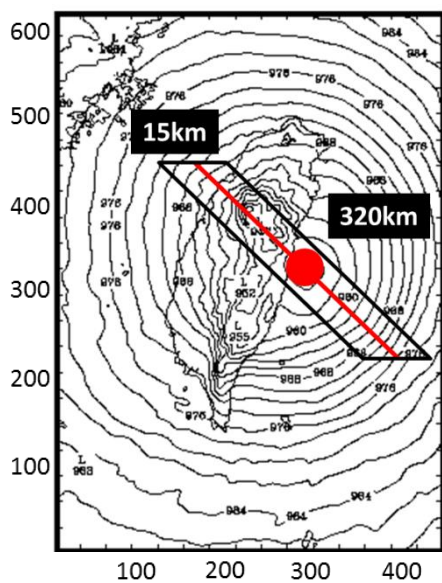
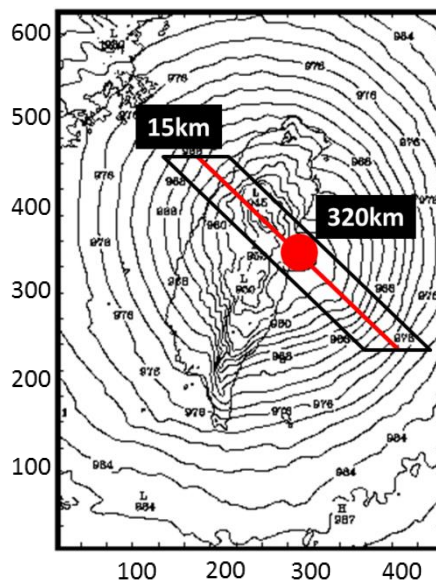


圖 4.25: 觀測(黑色)與實驗二之(紅色:WDM6_21、藍色:WDM6_31、綠色:WDM6_mix45)模擬颱風中心氣壓圖。虛線表示不同實驗的登陸台灣時間。圖上標示的時間為 UTC 時。

(a) WDM6_21



(b) WDM6_31



(c) WDM6_mix45

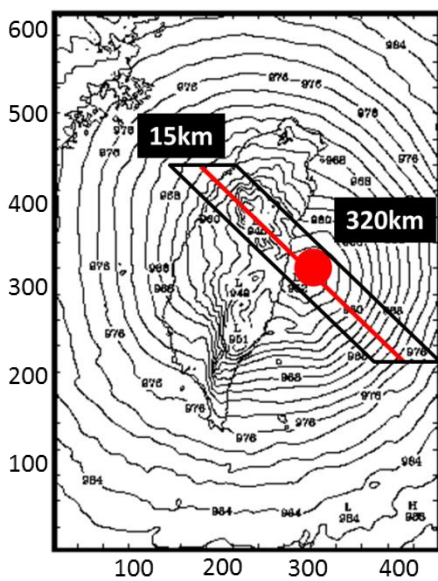
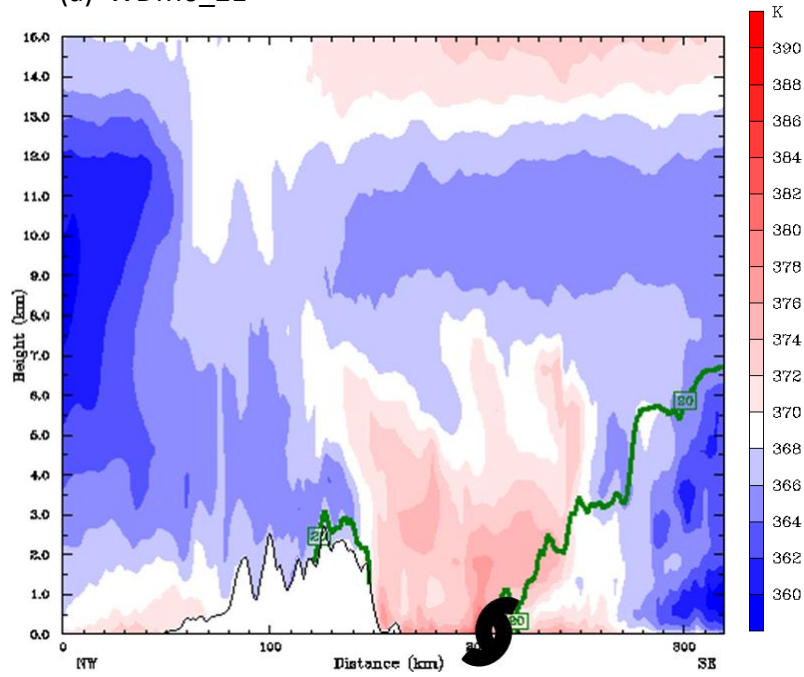
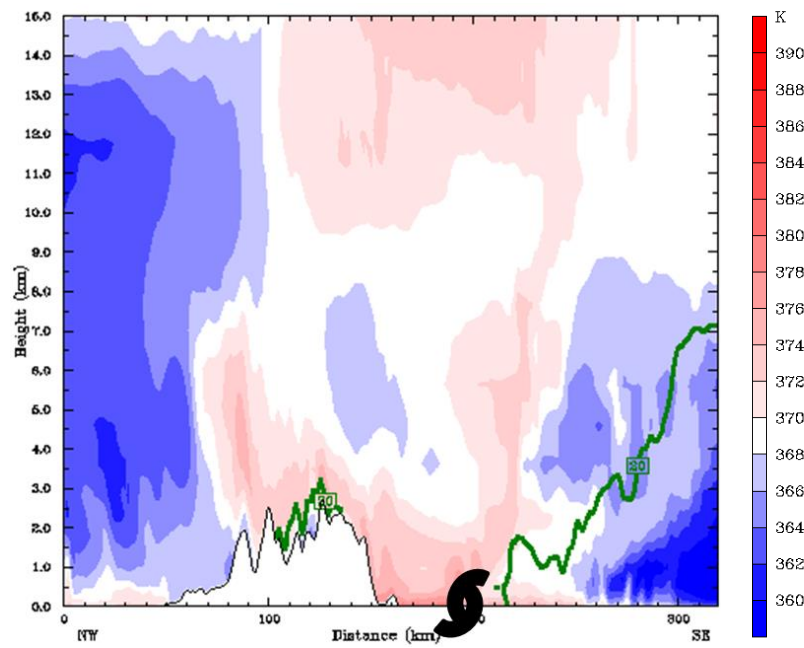


圖 4.26: 8 月 7 日 21Z(颱風登陸前)選取垂直剖面，圖上數字表示剖面的水平長度和寬度。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。水平軸標示的是距離(km)。

(a) WDM6_21



(b) WDM6_31



(c) WDM6_mix45

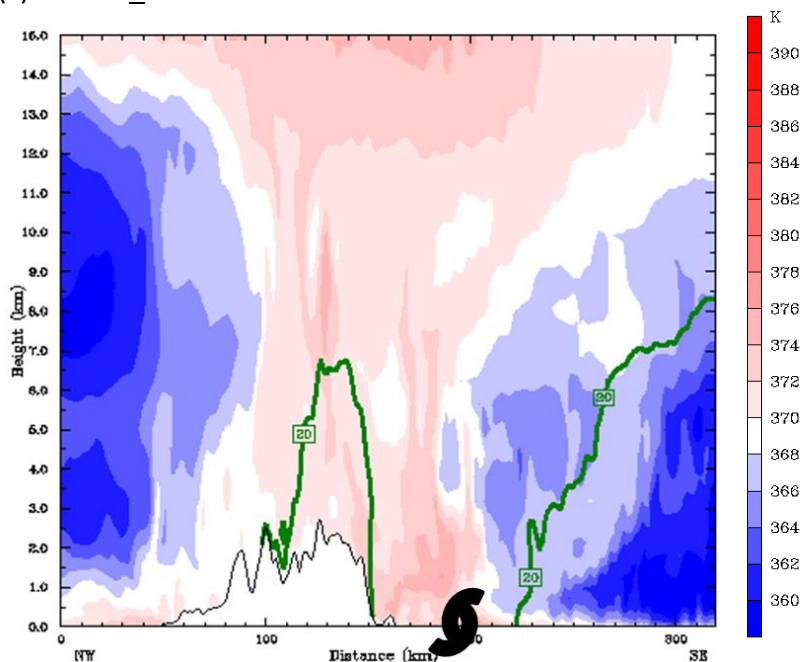
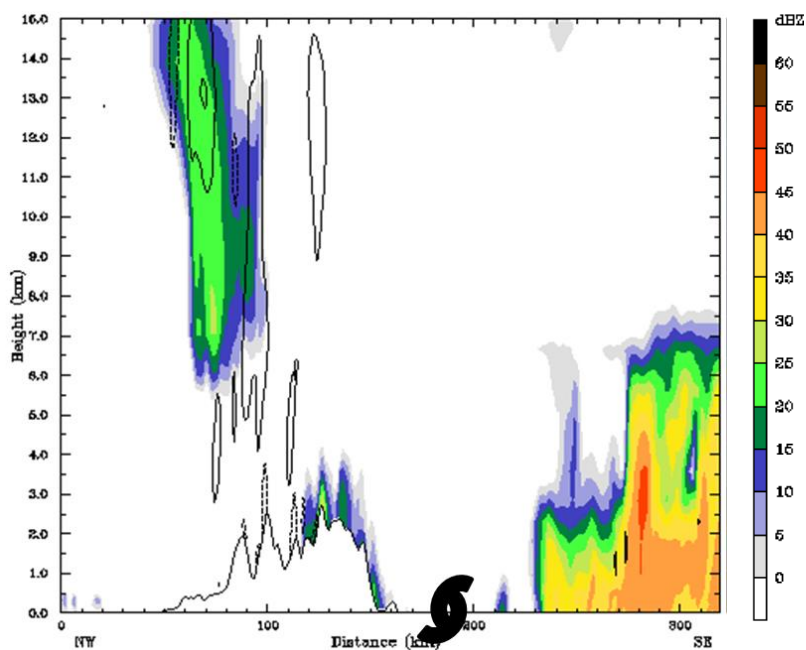
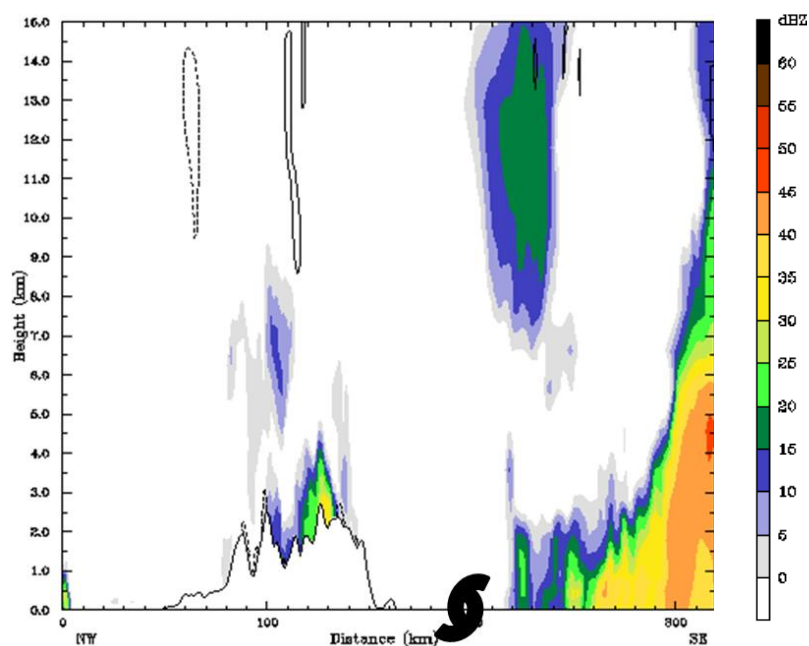


圖 4.27: 為圖 4.26 方框中西北-東南走向之垂直剖面圖。陰影區表示相當位溫(K)，綠色實線表示雷達回波 20dBZ 等值線。圖上標示為颱風海平面中心位置。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。

(a) WDM6_21



(b) WDM6_31



(c) WDM6_mix45

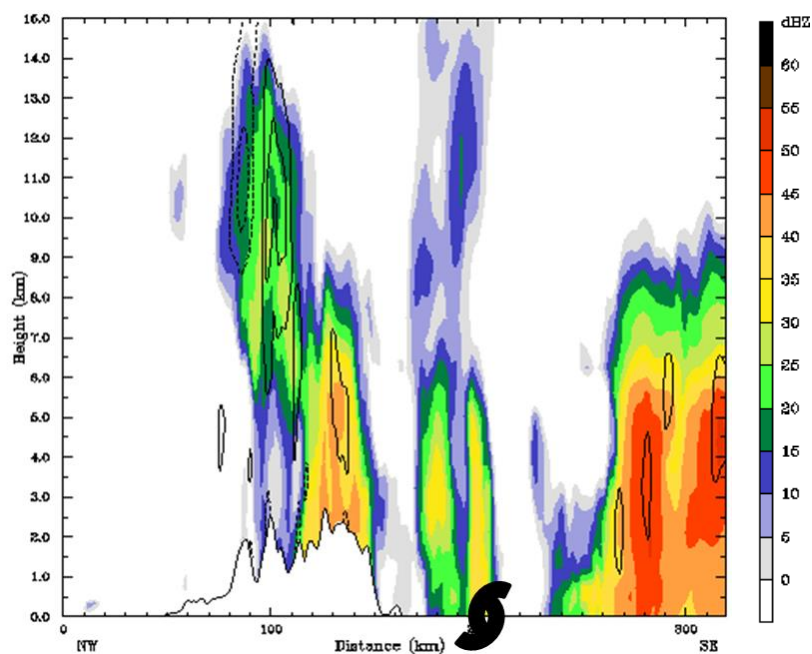
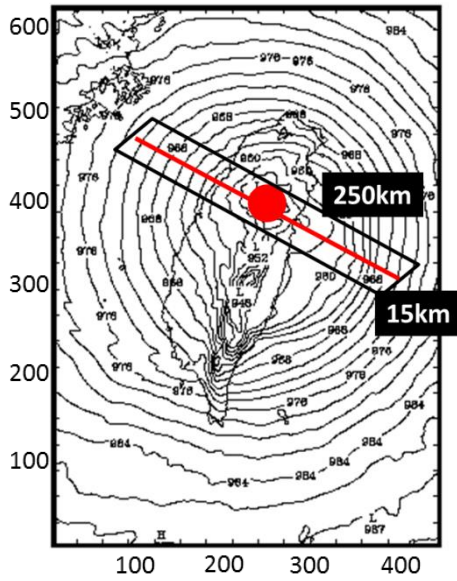
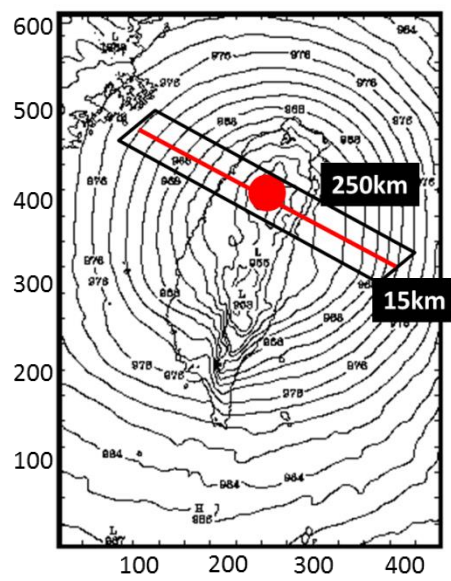


圖 4.28: 為圖 4.26 方框中西北-東南走向之垂直剖面。陰影區表示雷達回波(dBZ)，實線表示正垂直速度(間距:100cm/s)，虛線表示負垂直速度(間距:50 cm/s)。圖上標示為颱風海平面中心位置。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。

(a) WDM6_21



(b) WDM6_31



(c) WDM6_mix45

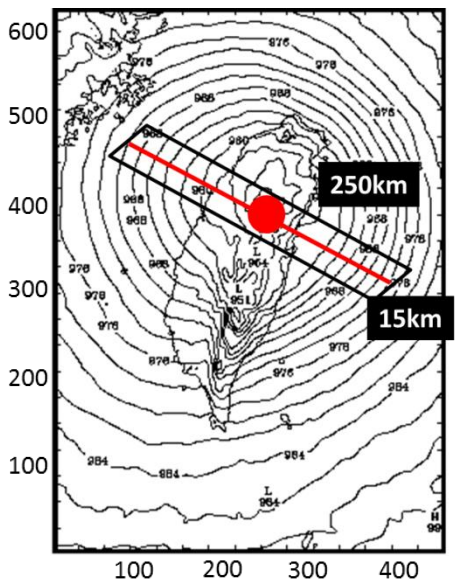
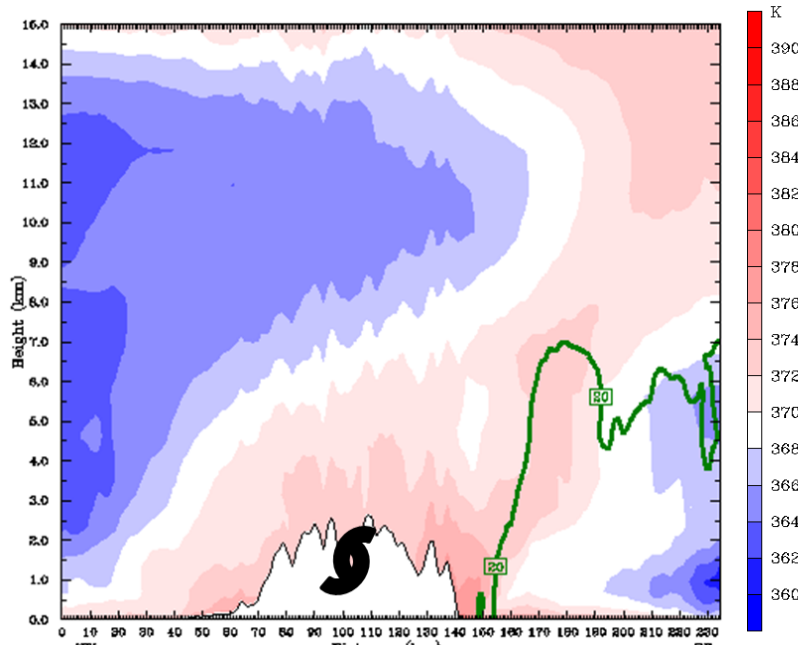
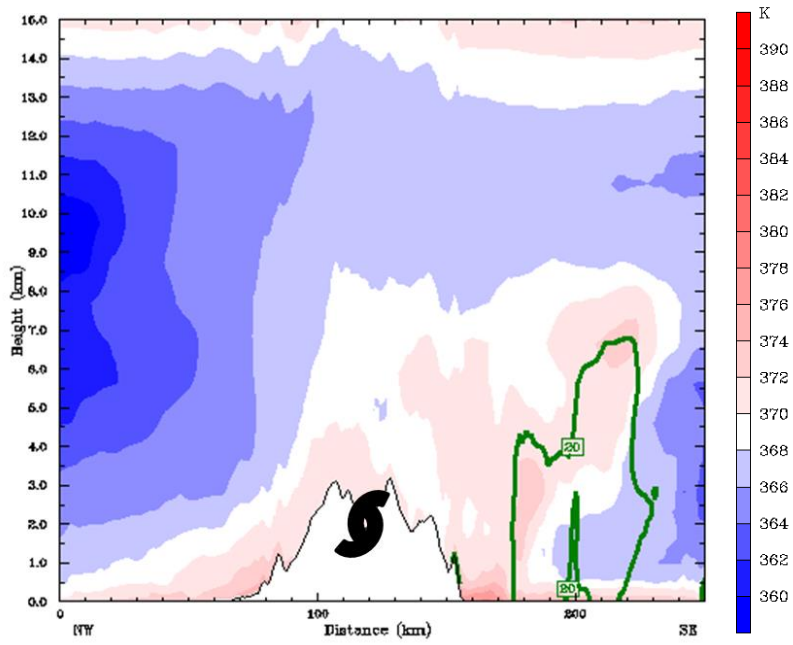


圖 4.29、8 月 8 日 01z(颱風在台灣地形上)選取剖面，圖上數字表示垂剖面的水平長度和寬度。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。水平軸標示的是距離(km)。

(a) WDM6_21



(b) WDM6_31



(c) WDM6_mix45

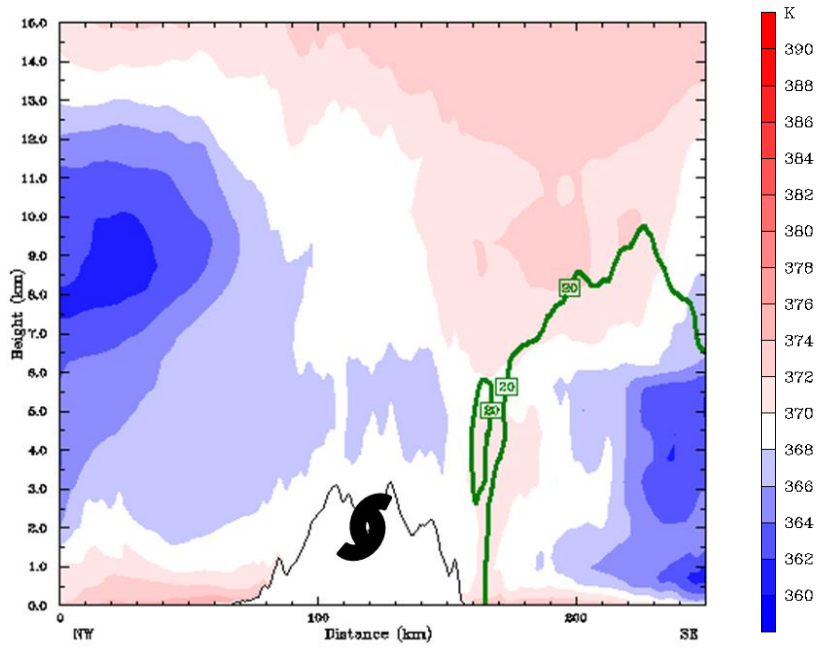


圖 4.30: 為圖 4.29 方框中西北-東南走向之垂直剖面圖。陰影區表示相當位溫(K)，綠色實線表示雷達回波 20dBZ 等值線。圖上標示為颱風海平面中心位置。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。

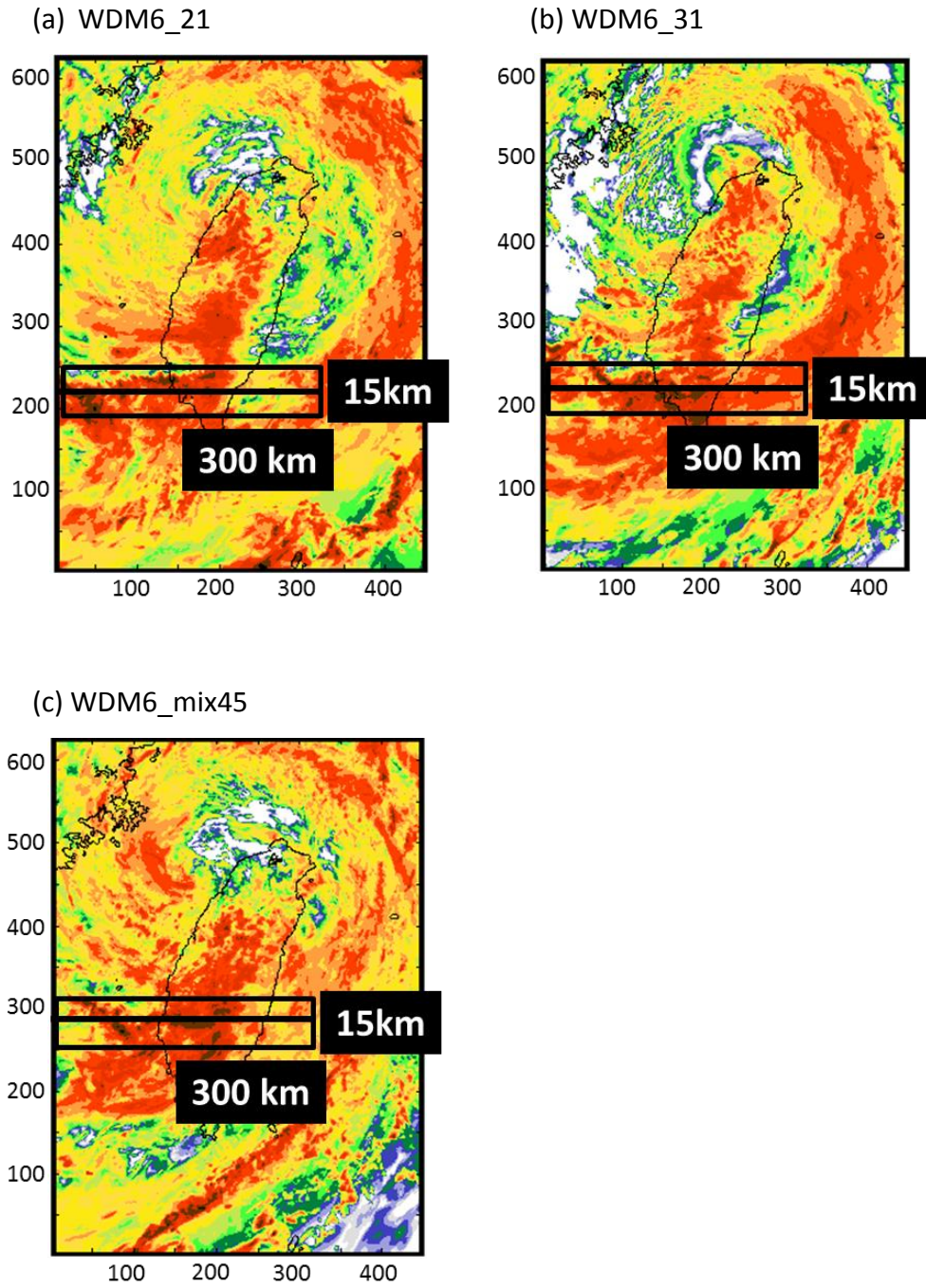
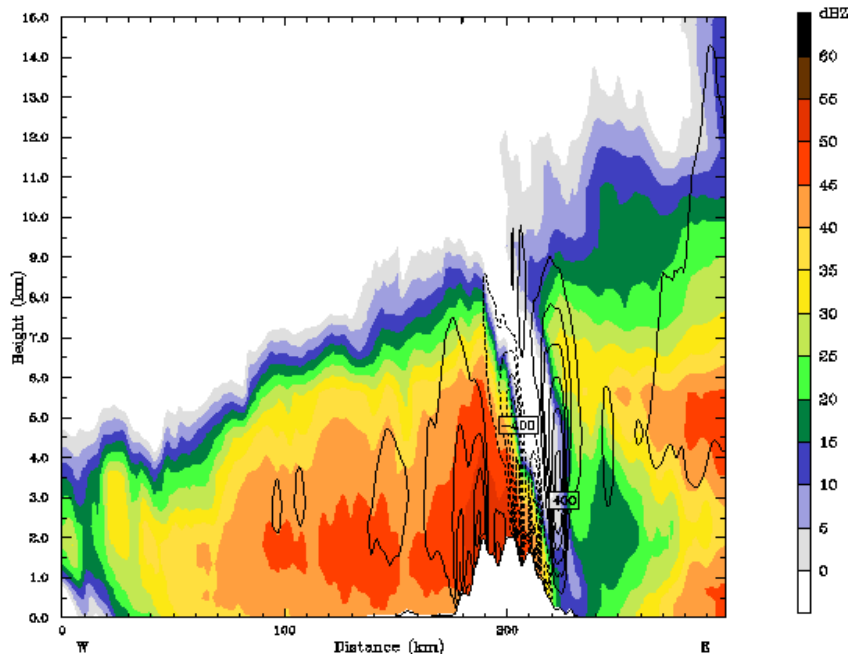
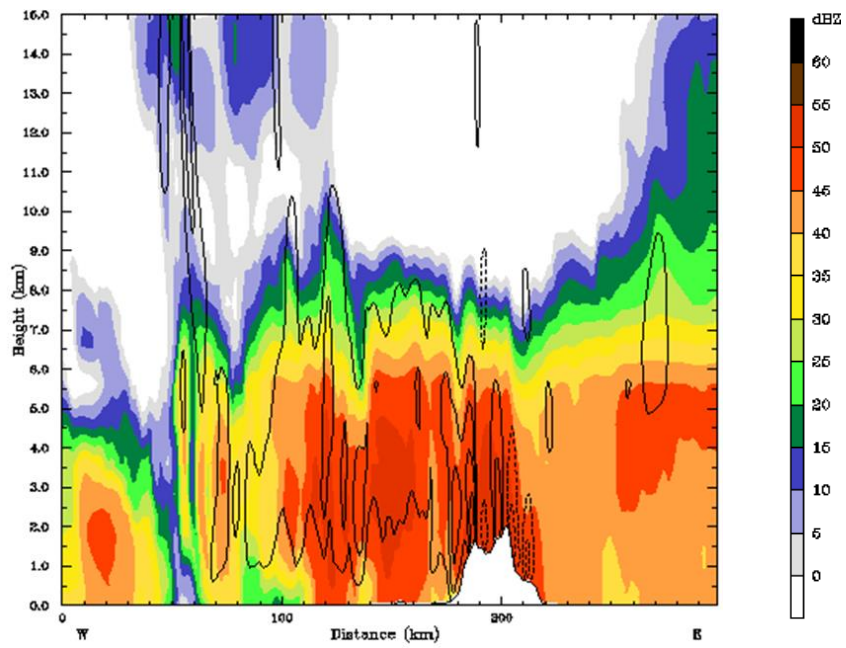


圖 4.31: 8 月 8 日 12Z(颱風離開陸地)選取剖面，圖上數字表示垂直剖面的水平長度和寬度。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。水平軸標示的是距離(km)。

(a) WDM6_21



(b) WDM6_31



(c) WDM6_mix45

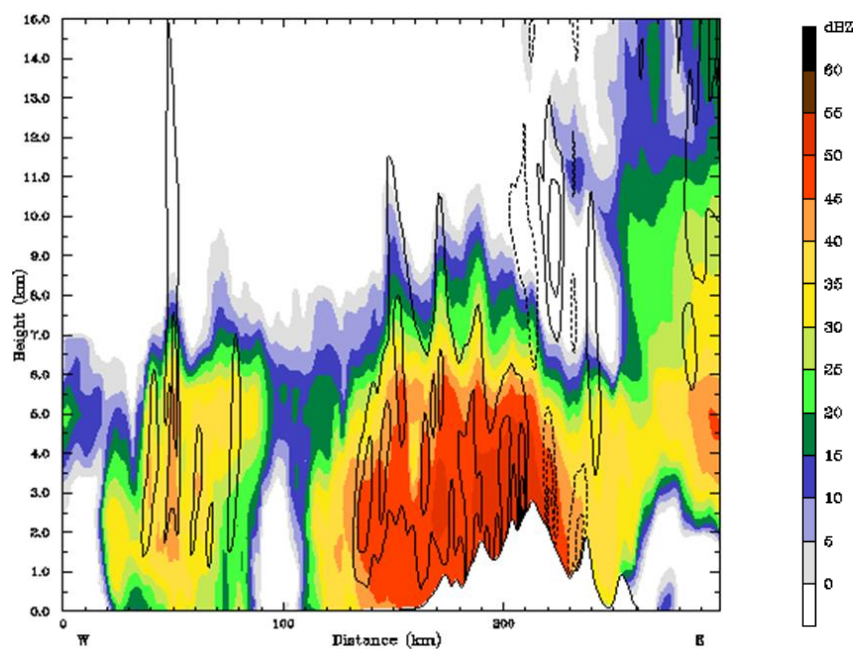


圖 4.32: 為圖 4.31 東-西向垂直剖面。陰影區表示雷達回波(dBZ)圖，實線表示正垂直速度(間距:100 cm/s)，虛線表示負垂直速度(間距:100 cm/s)。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。

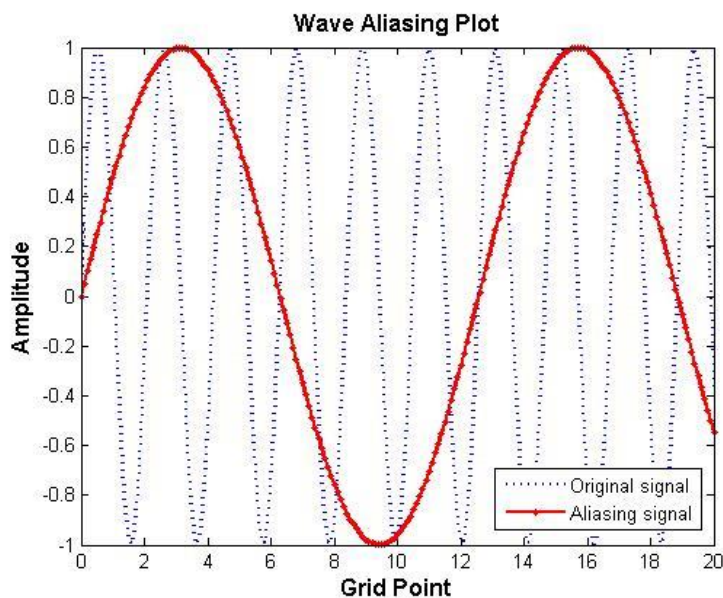


圖 4.33: wave aliasing 示意圖，黑色線為原始訊號，紅色線為 wave aliasing 時誤判的訊號。

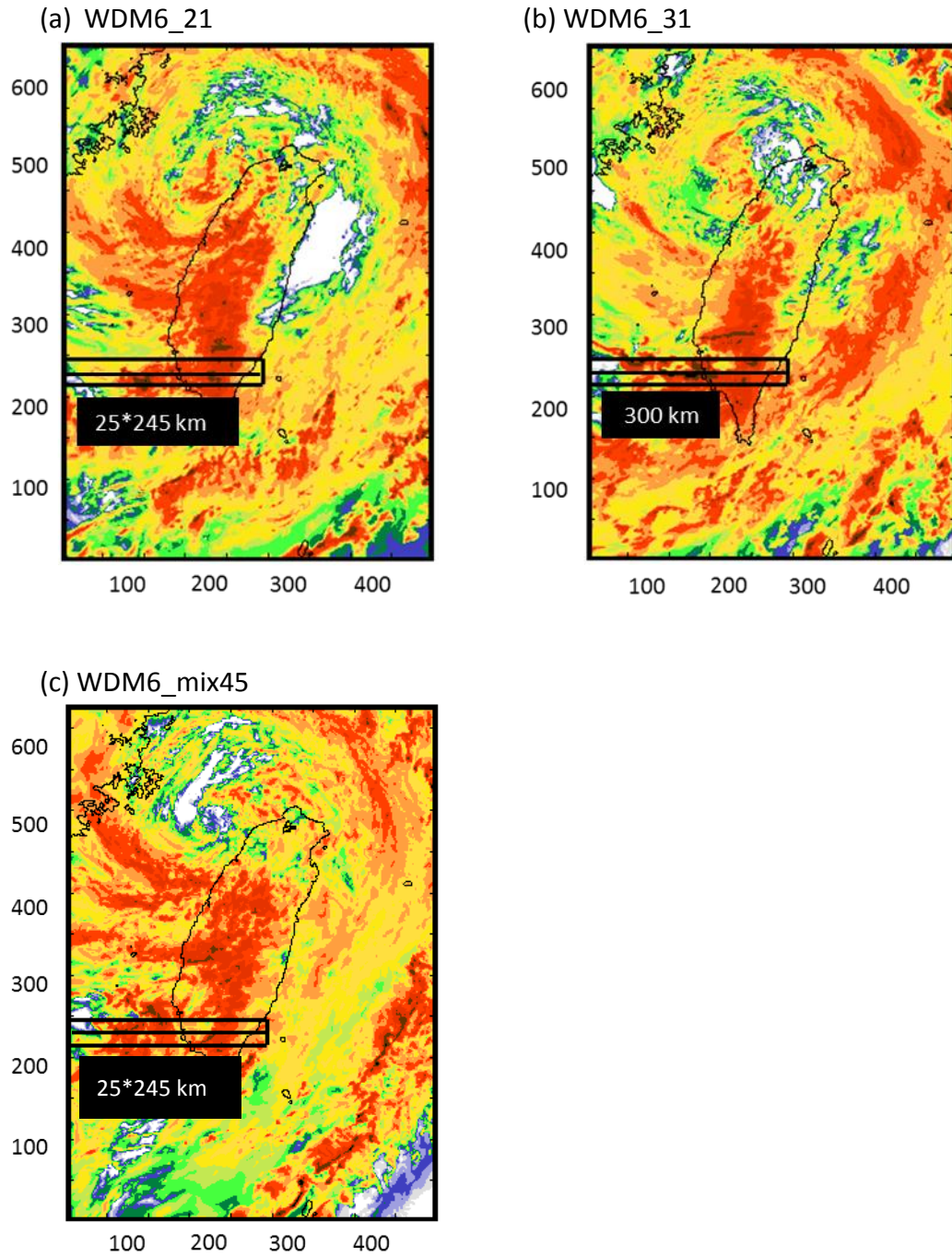
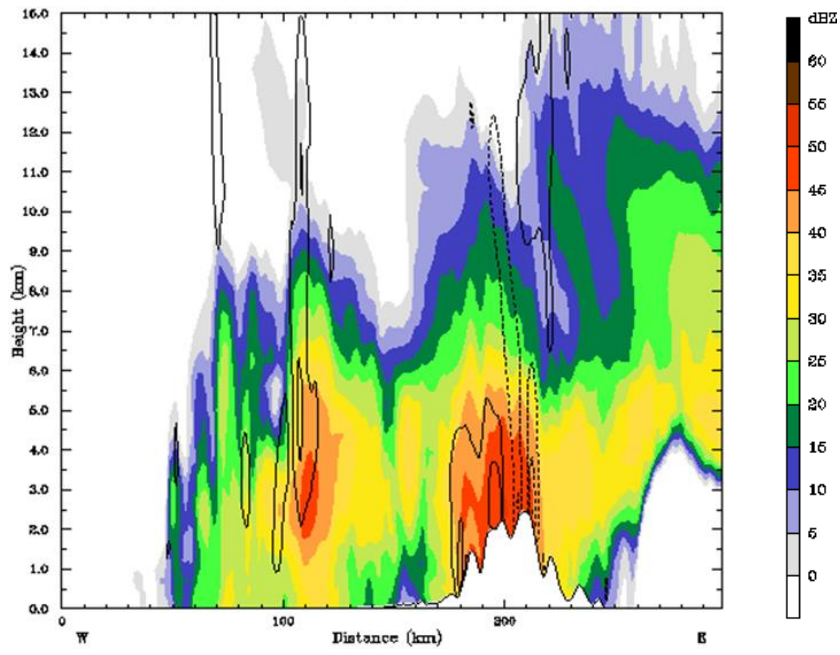
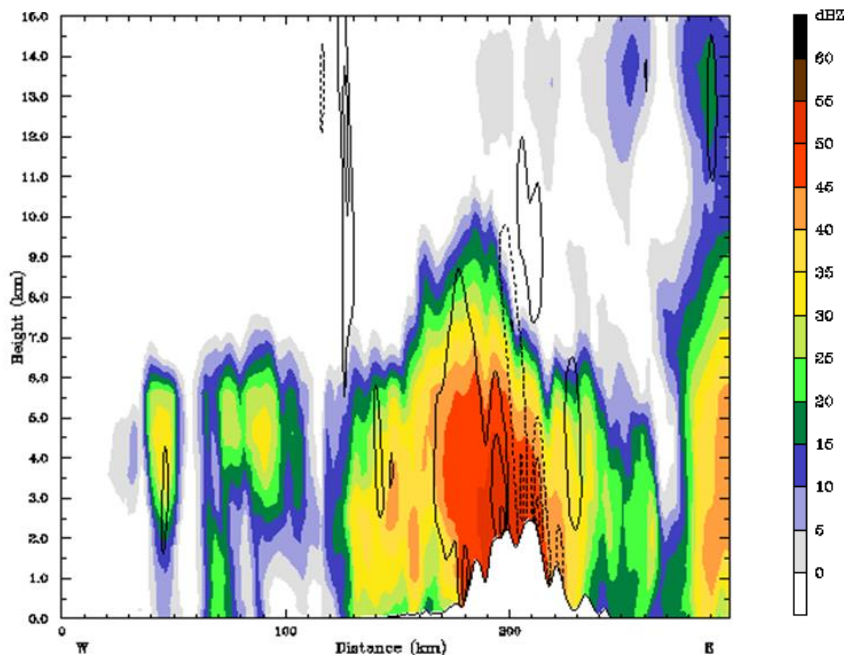


圖 4.34: 8 月 8 日 15Z(颱風離開陸地)選取剖面，圖上數字表示垂直剖面的水平長度和寬度。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗結果。水平軸標示的是距離(km)。

(a) WDM6_21



(b) WDM6_31



(c) WDM6_mix45

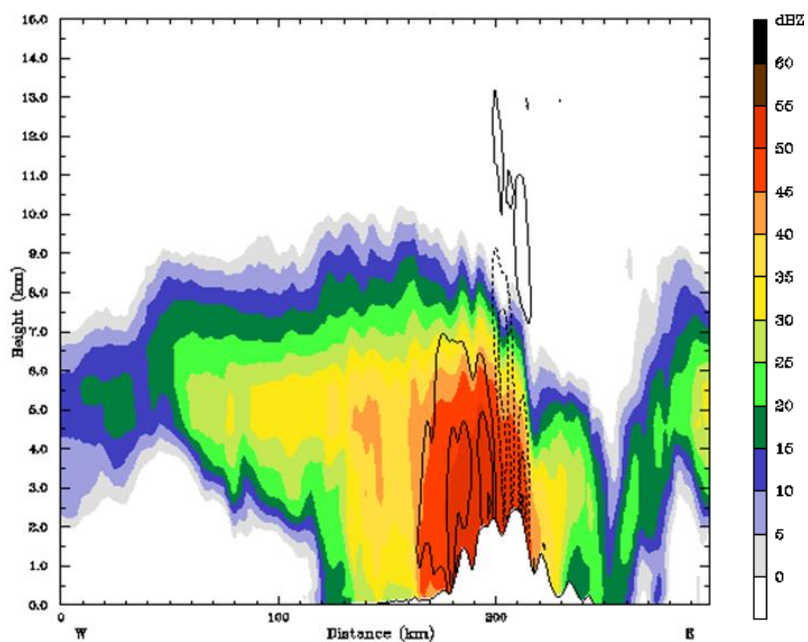
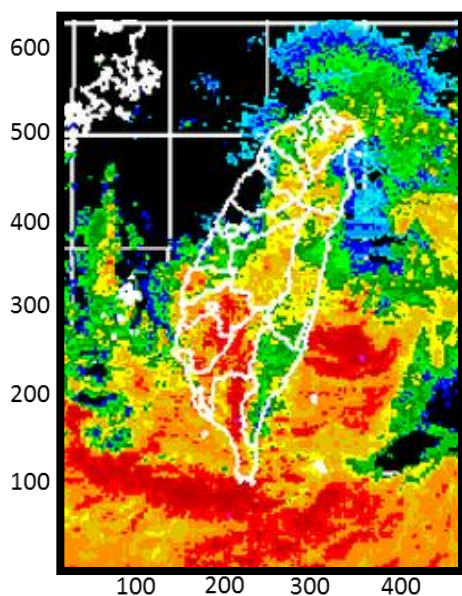
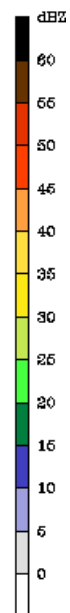
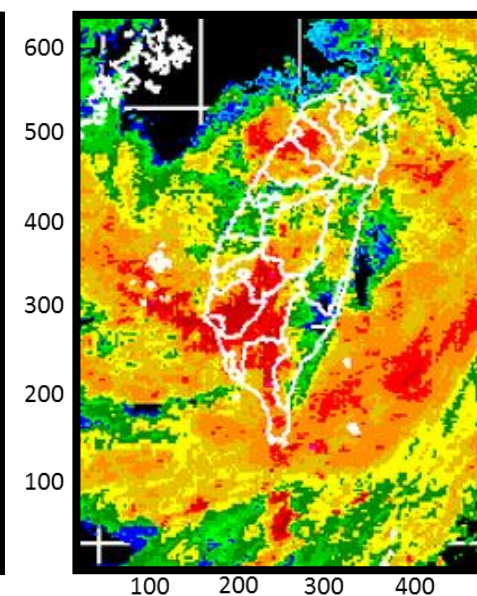


圖 4.35: 為圖 4.34 東-西向垂直剖面。陰影區表示雷達回波(dBZ)圖，實線表示正垂直速度(間距:100 cm/s)，虛線表示負垂直速度(間距:100 cm/s)。圖(a)、(b)、(c)分別為 WDM6_21、WDM6_31 和 WDM6_mix45 實驗。

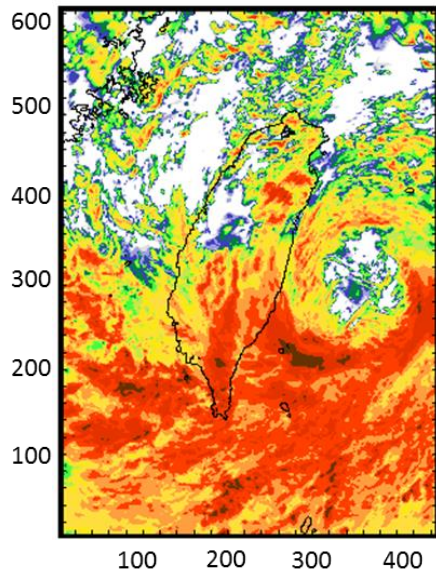
(a) 20090807 12Z OBS



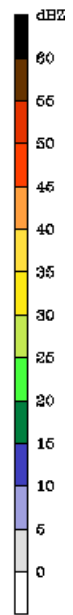
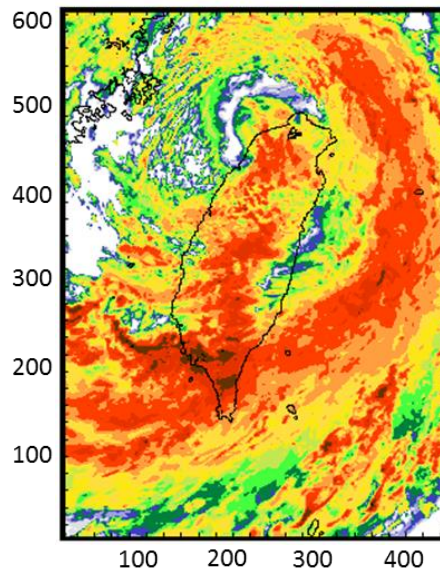
(b) 20090808 12Z OBS



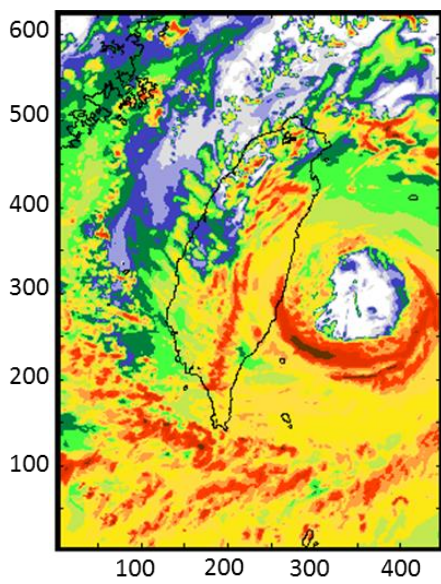
(c) 20090807 12Z WDM6_31



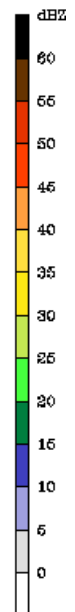
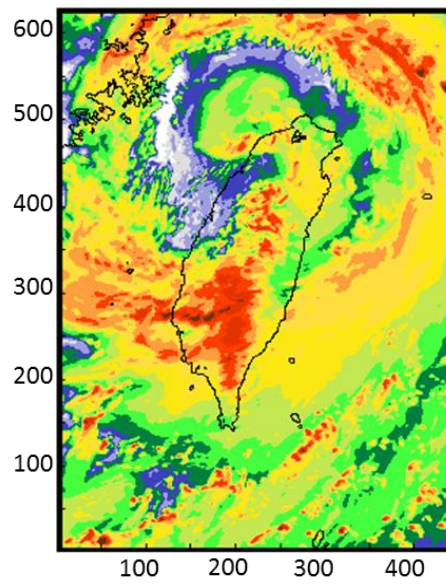
(d) 20090808 12Z WDM6_31



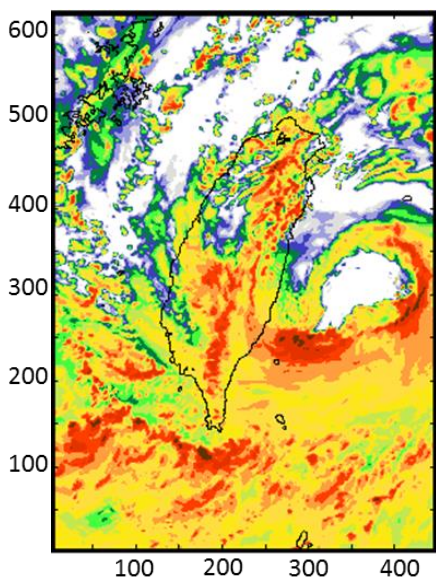
(e) 20090807 12Z Thompson_31



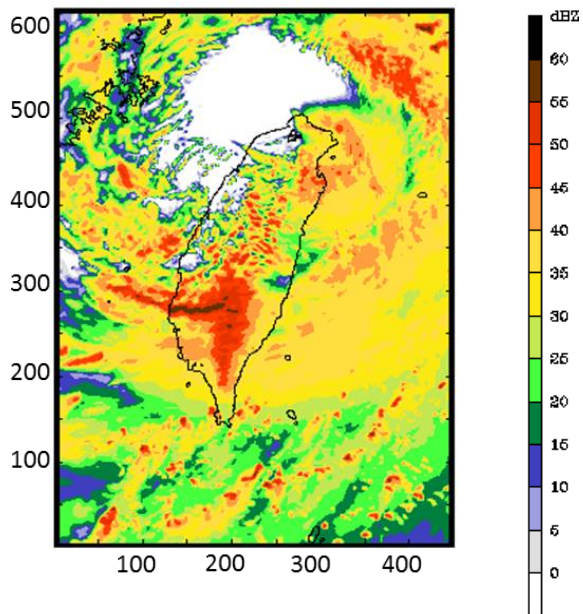
(f) 20090808 12Z Thompson_31



(g) 20090807 12Z Morrison_31

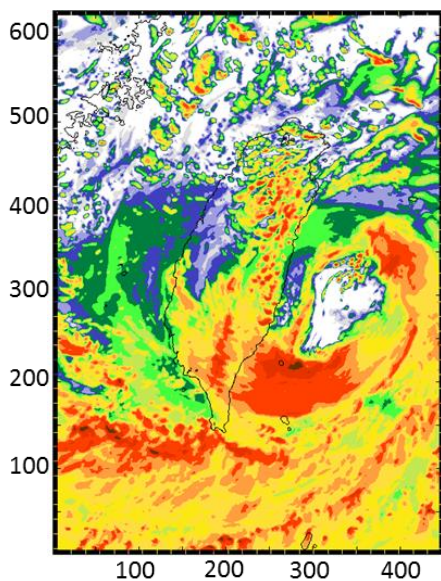


(h) 20090808 12Z Morrison_31



(i) 20090807 12Z

Milbrandt and Yau_31



(j) 20090808 12Z

Milbrandt and Yau_31

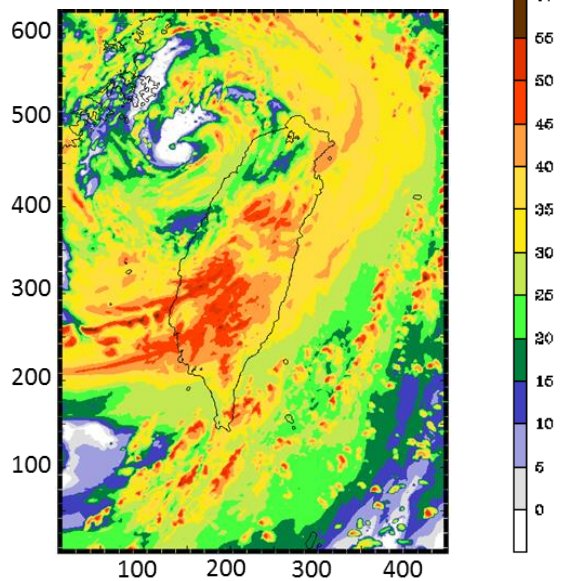
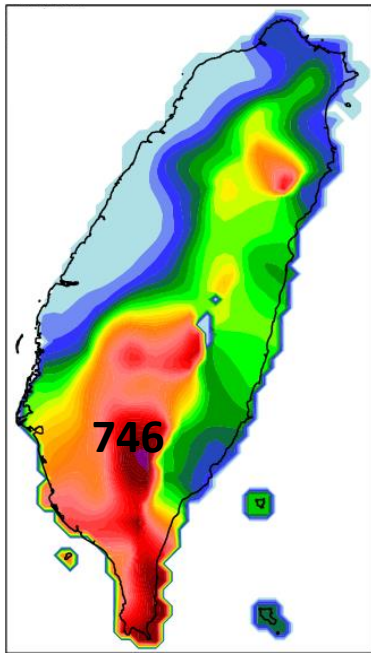
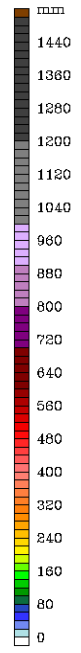
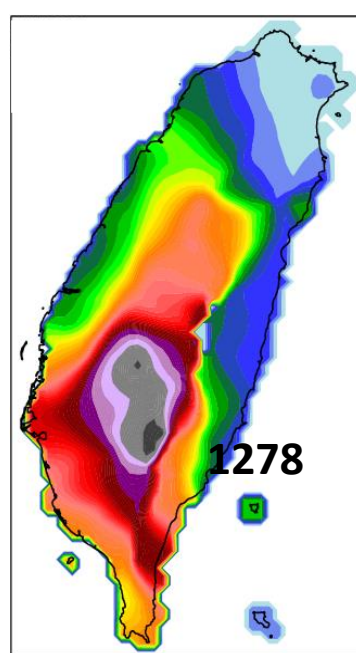


圖 4.36: 觀測與實驗三之雷達最大回波圖，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)、圖(i)(j)分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗。圖(a)(c)(e)(g)(i)為 2009 年 8 月 7 日 12Z 時，圖(b)(d)(f)(h)(j)為 2009 年 8 月 8 日 12Z 時。水平軸標示的是距離(km)。

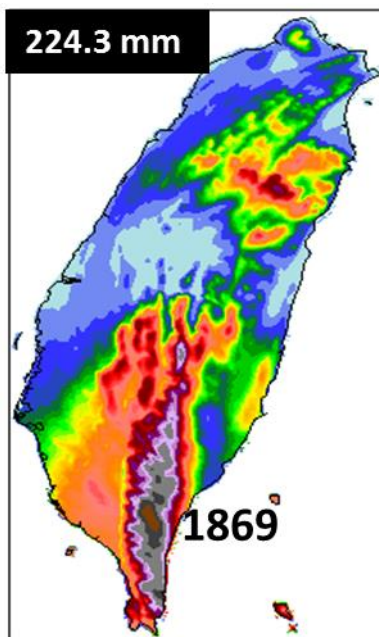
(a) 0807 24 小時累積降雨 OBS



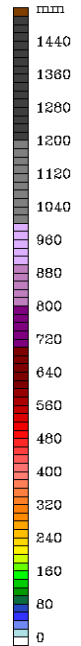
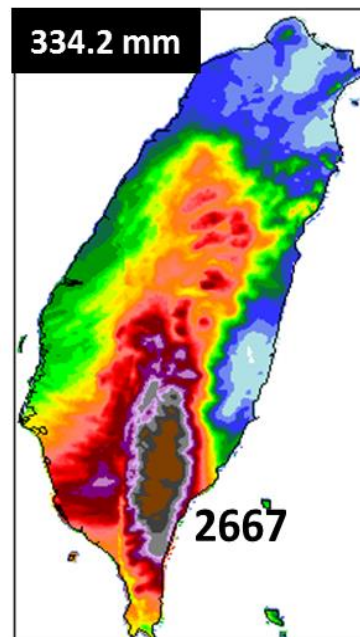
(b) 0808 24 小時累積降雨 OBS



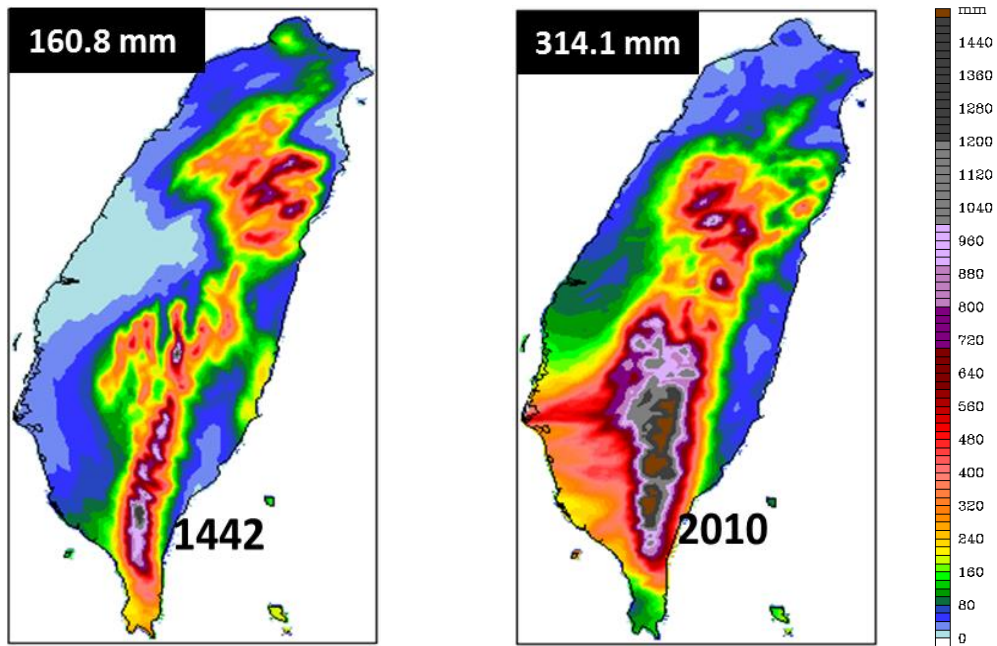
(c) 0807 24 小時累積降雨 WDM6_31



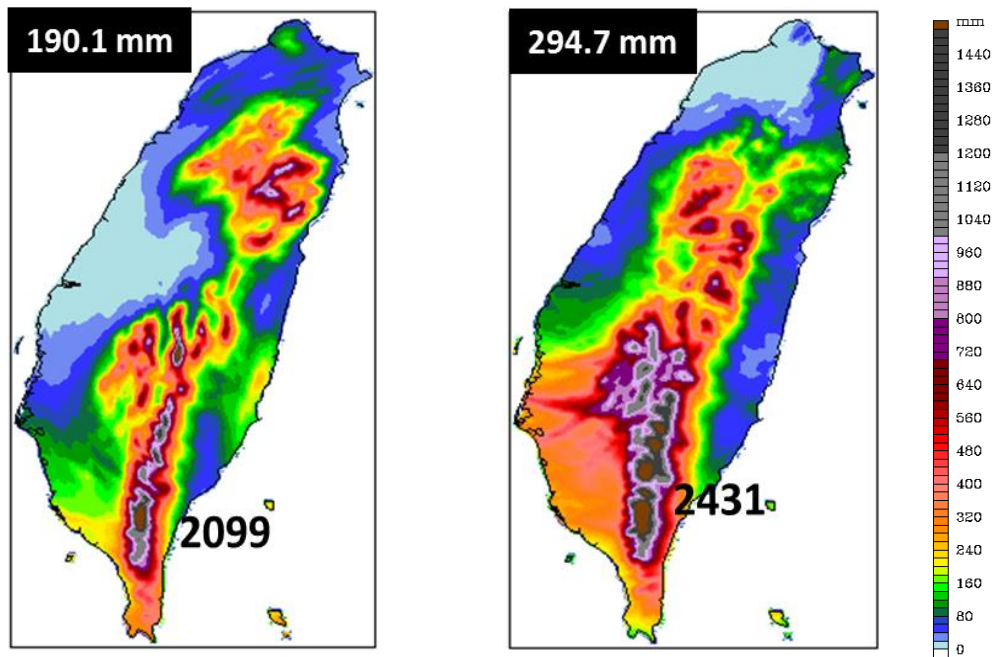
(d) 0808 24 小時累積降雨 WDM6_31



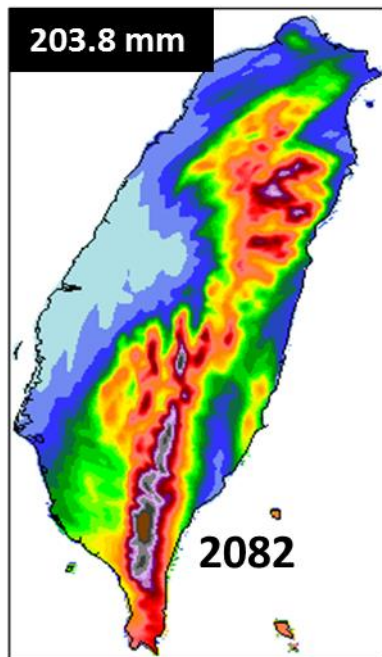
(e) 0807 24 小時累積降雨 Thompson_31 (f) 0808 24 小時累積降雨 Thompson_31



(g) 0807 24 小時累積降雨 Morrison_31 (h) 0808 24 小時累積降雨 Morrison_31



(i) 0807 24 小時累積降雨
Milbrandt and Yau_31



(j) 0808 24 小時累積降雨
Milbrandt and Yau_31

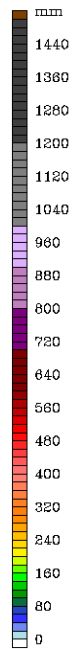
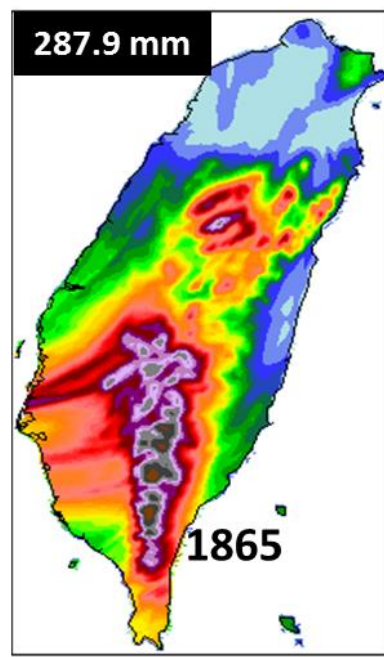
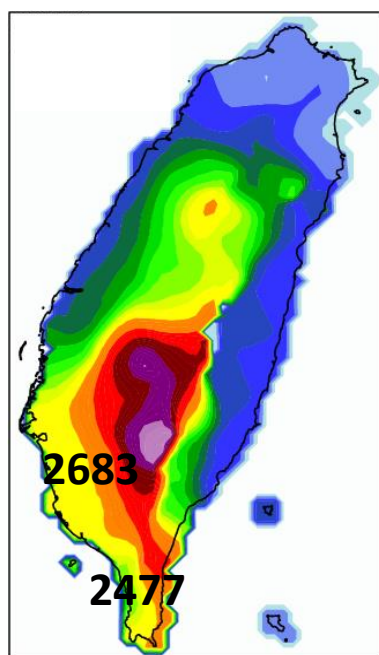
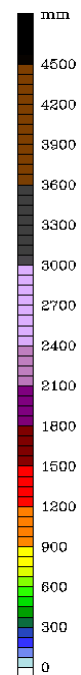
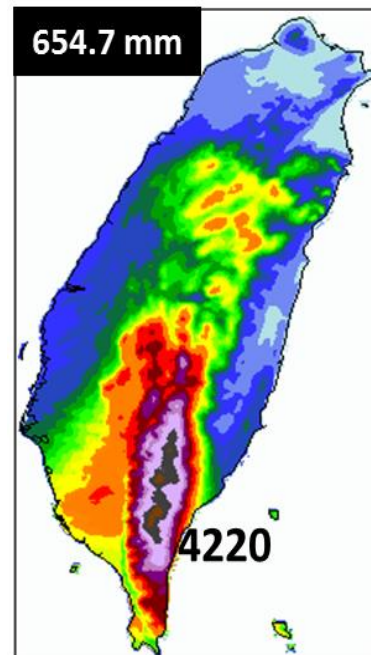


圖 4.37: 觀測與實驗三 24 小時累積降雨，圖(a)(b)、圖(c)(d)、圖(e)(f)、圖(g)(h)、圖(i)(j)分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗。圖(a)(c)(e)(g)(i)為 2009 年 8 月 7 日累積雨量圖，圖(b)(d)(f)(h)(j)為 2009 年 8 月 8 日累積雨量圖。圖中黑色框框內數字為陸地上 24 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。

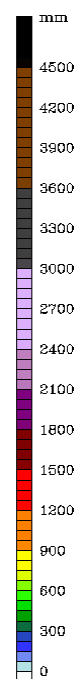
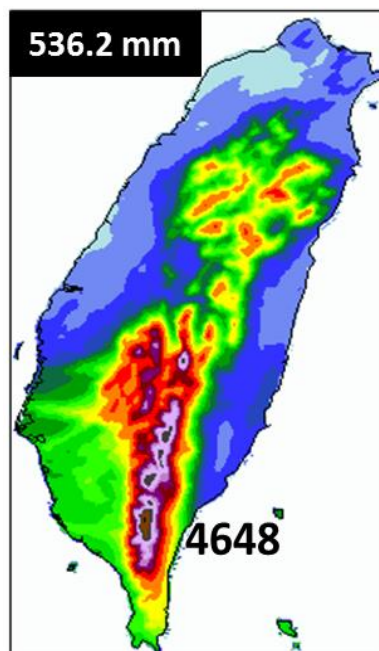
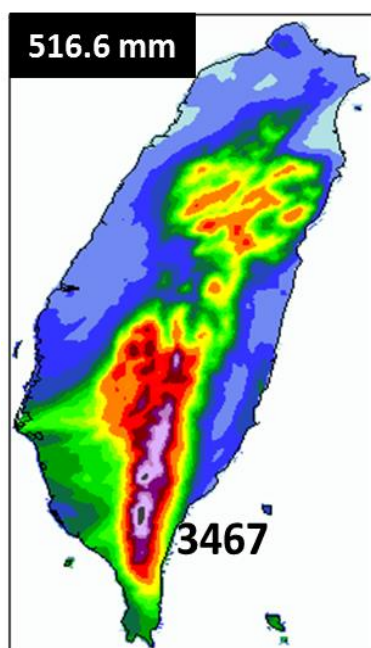
(a) 0807-00809 72 小時累積降雨
OBS



(b) 0807-00809 72 小時累積降雨
WDM6_31



(c) 0807-00809 72 小時累積降雨 Thompson_31 (d) 0807-00809 72 小時累積降雨 Morrison_31



(e) 0807-00809 72 小時累積降雨 Milbrandt and Yau_31

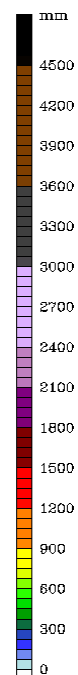
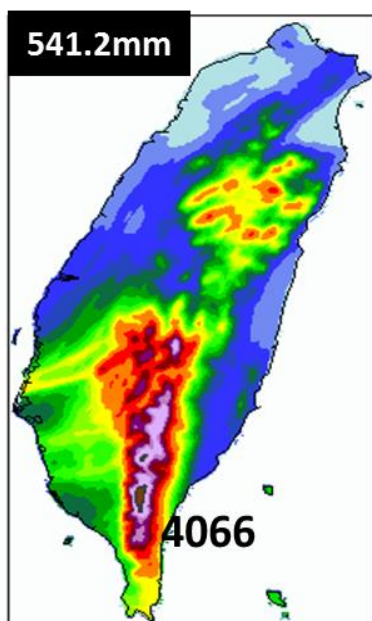


圖 4.38: 觀測與實驗三 2009 年 8 月 7 日至 8 月 9 日共 72 小時累積降雨量圖。圖 (a)、(b)、(c)、(d)、(e) 分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗。圖中左上角黑色框框內數字為陸地上 72 小時平均累積雨量，圖上標示的數字是降雨極大值(mm)。

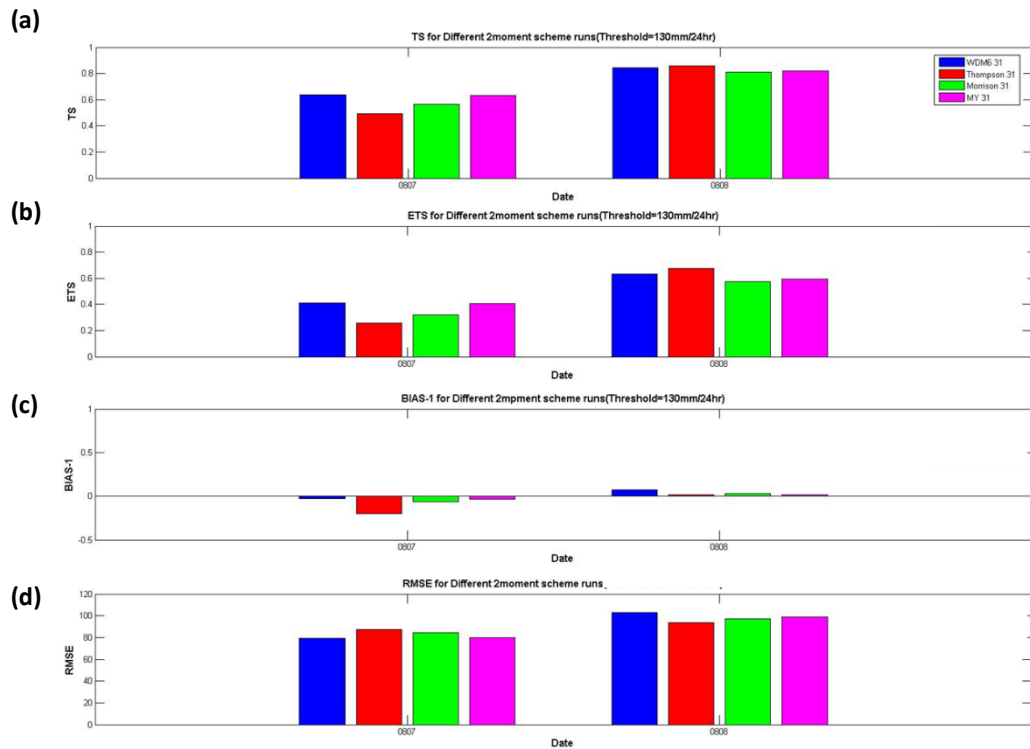


圖 4.39: 實驗三以 24 小時累積降雨達 130 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果圖。水平軸為日期，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中藍色表示 WDM6_31 實驗，紅色表示 Thompson_31 實驗，綠色表示 Morrison_31 實驗，紫色表示 Milbrandt and Yau_31 實驗。

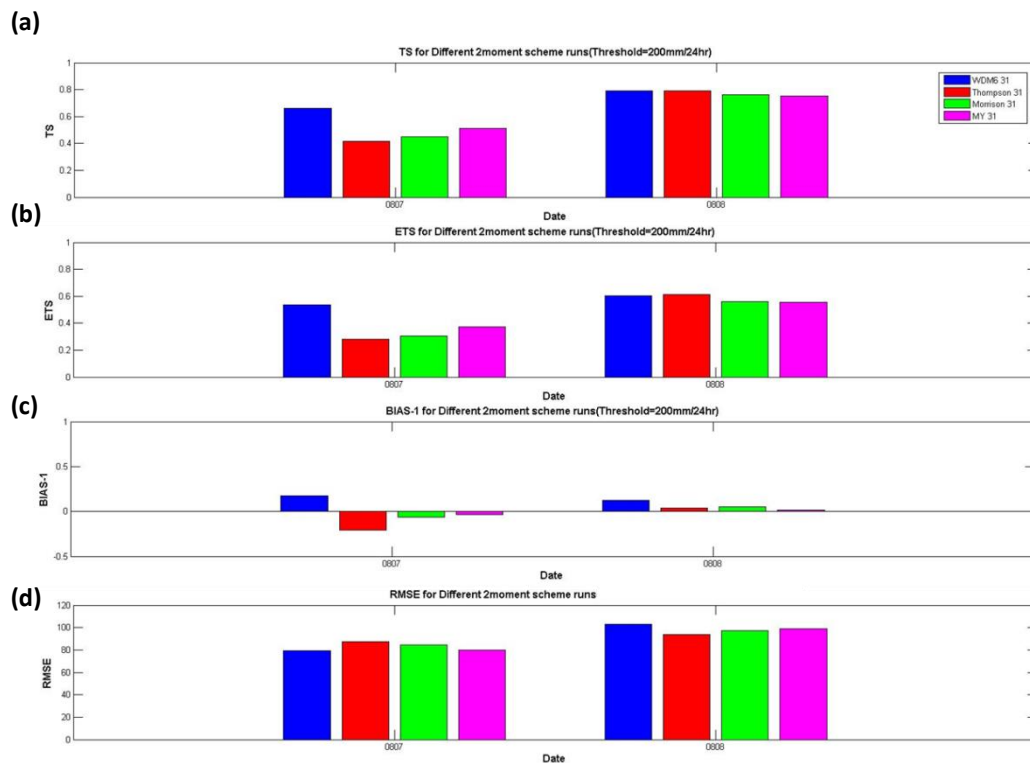


圖 4.40: 實驗三以 24 小時累積降雨達 200 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.39。

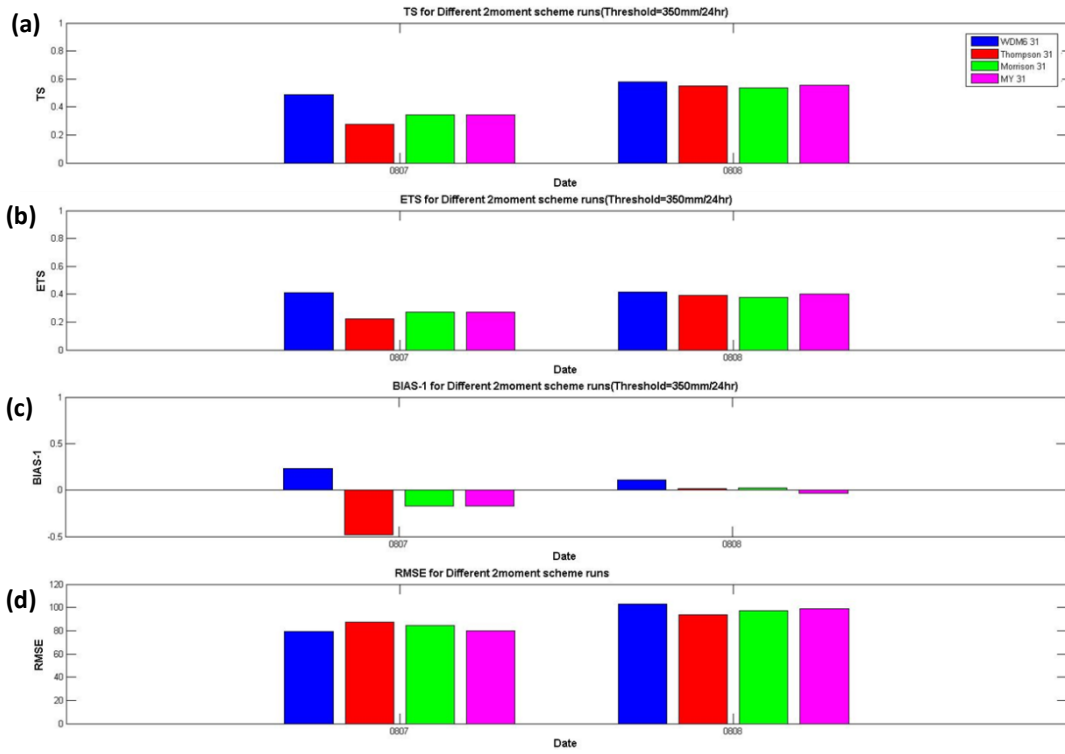


圖 4.41: 實驗三以 24 小時累積降雨達 350 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖說同圖 4.39。

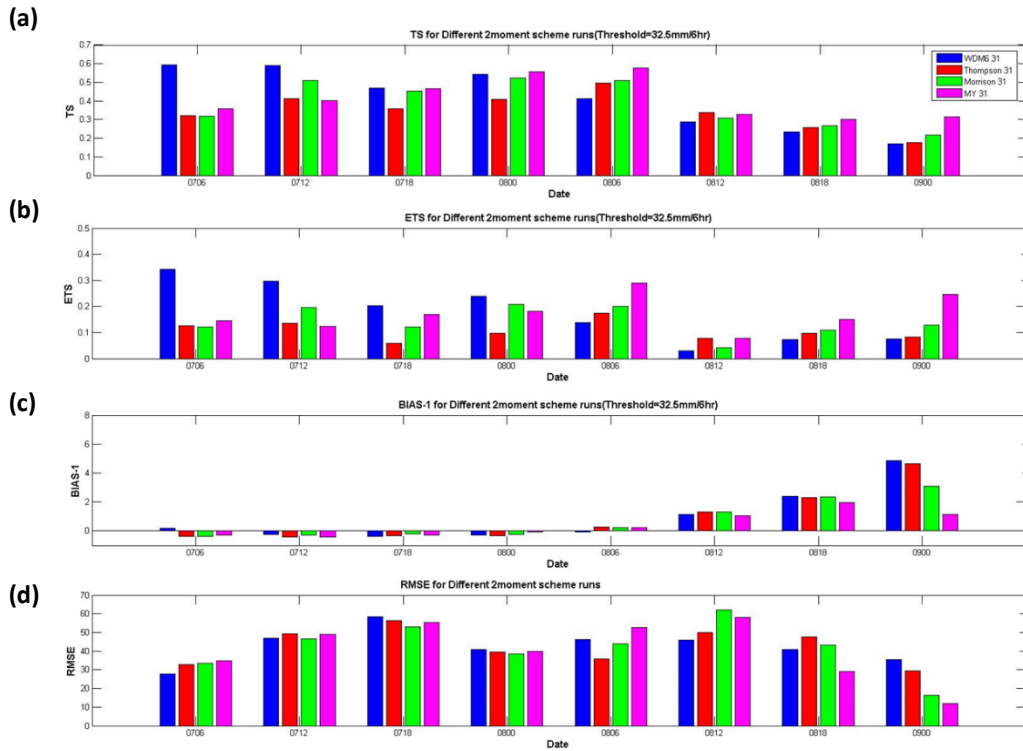


圖 4.42: 實驗三以 6 小時累積降雨達 32.5 毫米(豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。水平軸為時間，自 8 月 7 日至 8 月 8 日兩天。圖(a)為預兆得分(TS)、圖(b)為公平預兆得分(ETS)、圖(c)為偏離係數(BS)減去 1、圖(d)為均方根誤差(RMSE)。圖中藍色表示 WDM6_31 實驗，紅色表示 Thompson_31 實驗，綠色表示 Morrison_31 實驗，紫色表示 Milbrandt and Yau_31 實驗。

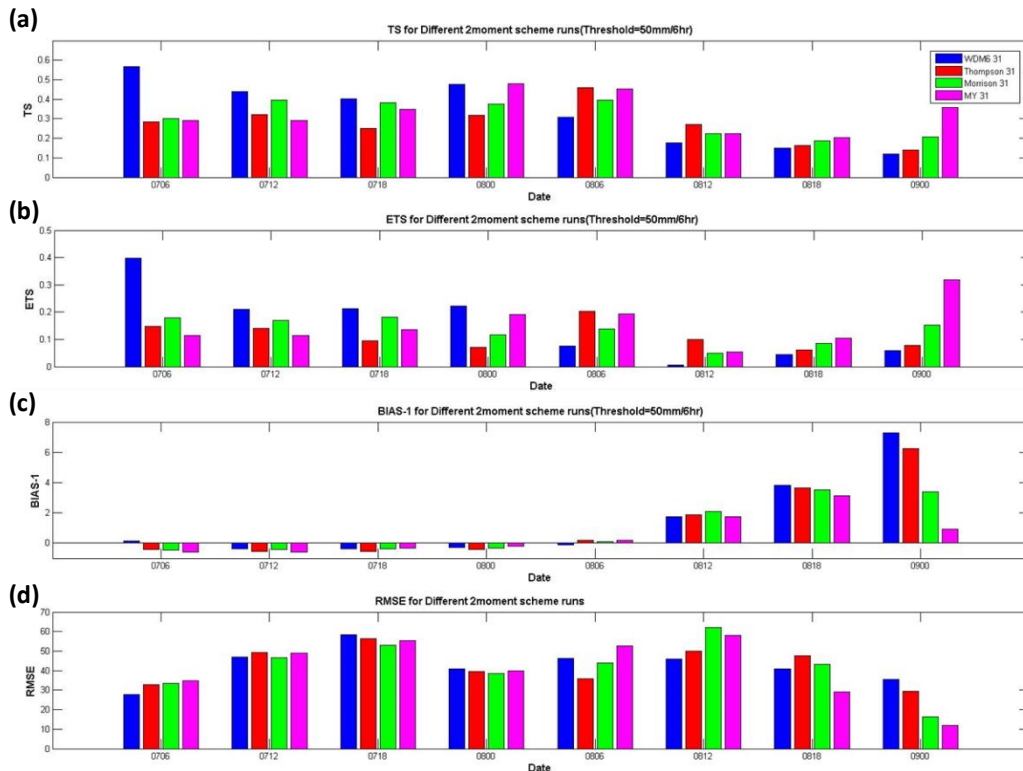


圖 4.43: 實驗三以 6 小時累積降雨達 50 毫米(大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。
圖說同圖 4.42。

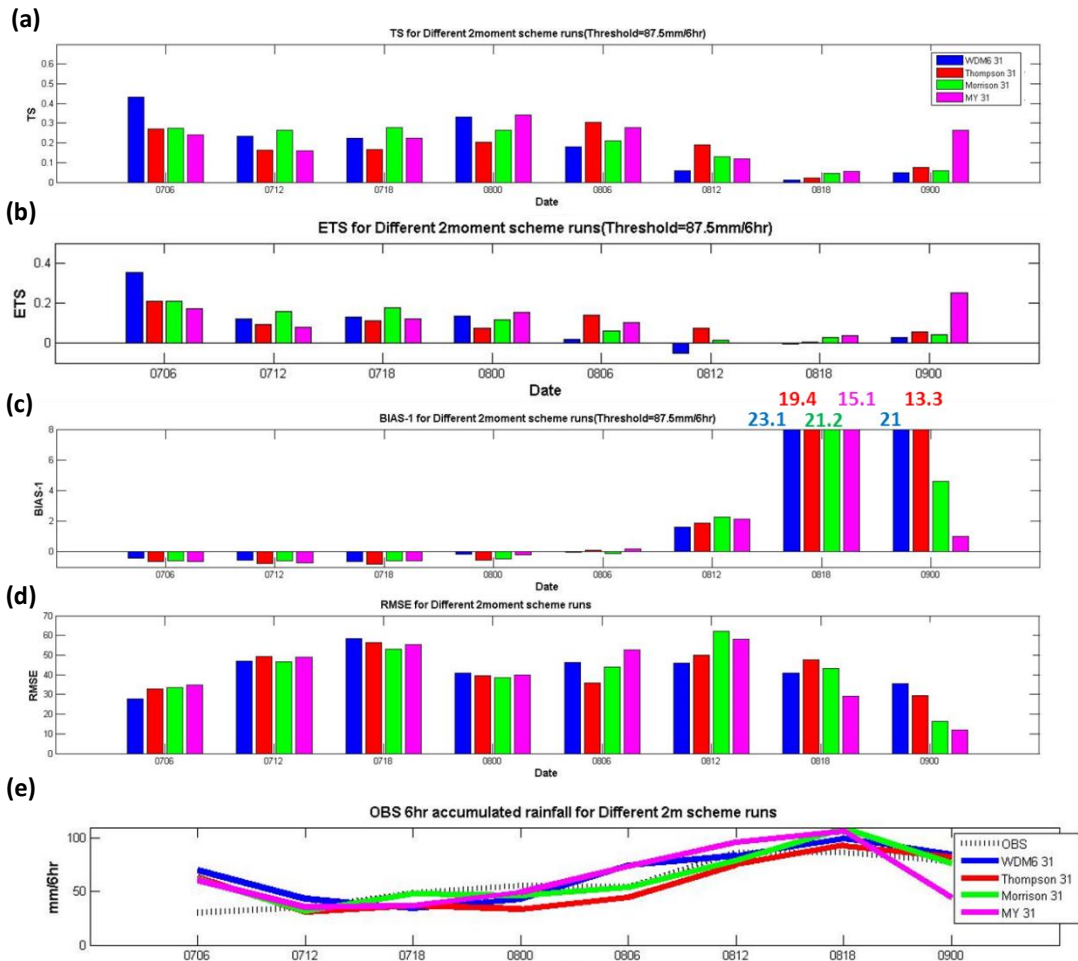
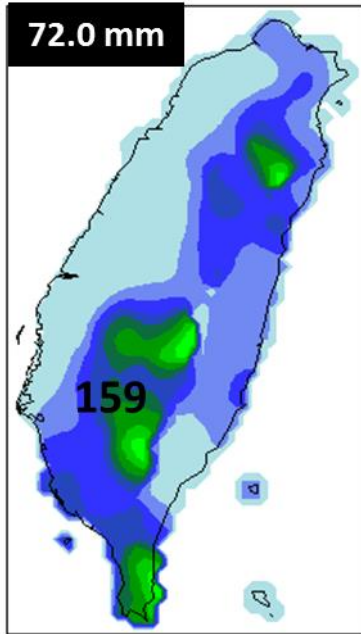
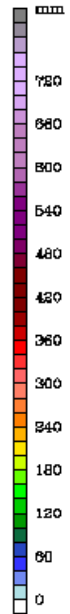
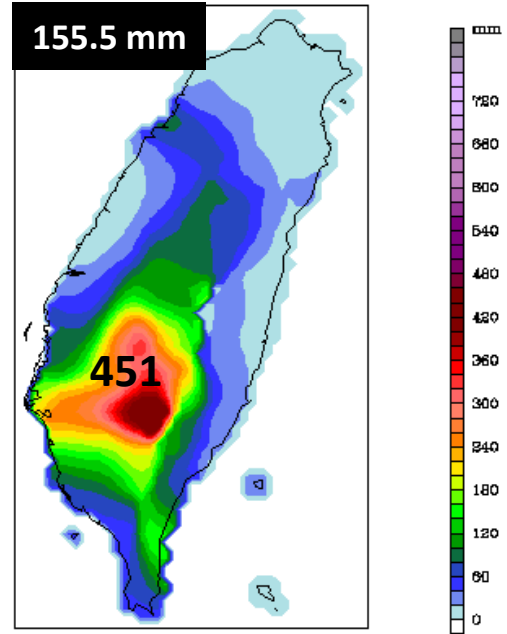


圖 4.44: 實驗三以 6 小時累積降雨達 87.5 毫米(超大豪雨)為門檻計算之降水校驗結果。圖(a)-(d)說明同圖 4.42，圖(e)為 399 個觀測測站與模擬每 6 小時平均累積降雨量時序圖。

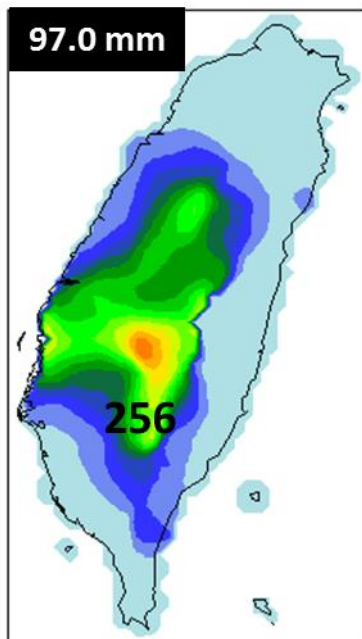
(a) 0807 06Z 6 小時累積降雨 OBS



(b) 0808 06Z 6 小時累積降雨 OBS

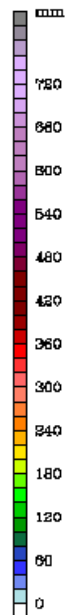
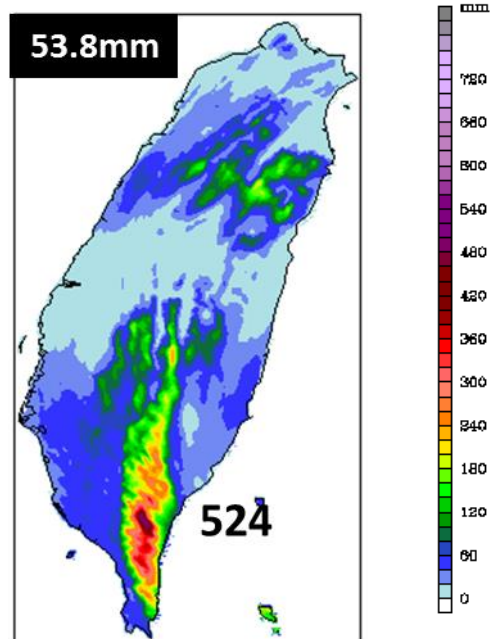


(c) 0809 00Z 6 小時累積降雨 OBS

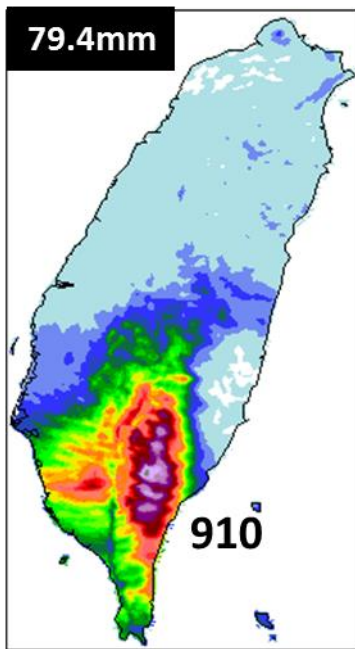


(d) 0807 06Z 6 小時累積降雨

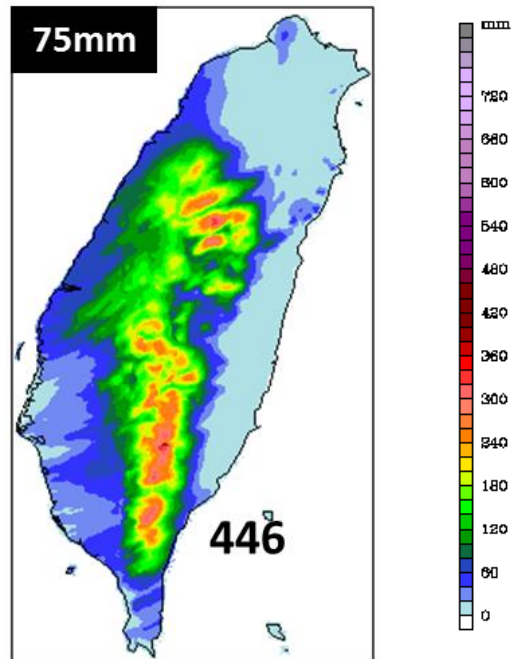
WDM6_31



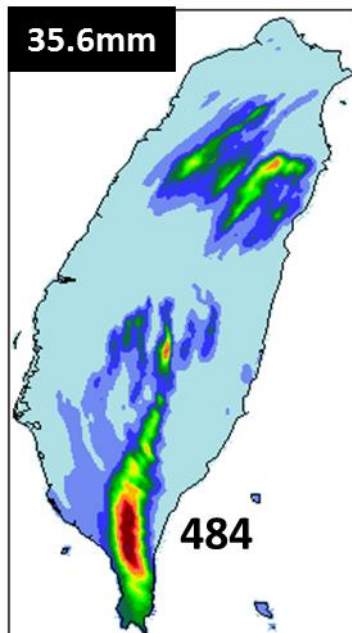
(e) 0808 06Z 6 小時累積降雨
WDM6_31



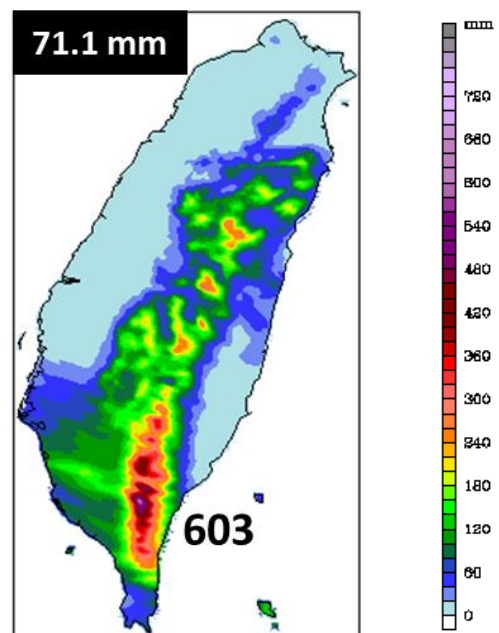
(f) 0809 00Z 6 小時累積降雨
WDM6_31



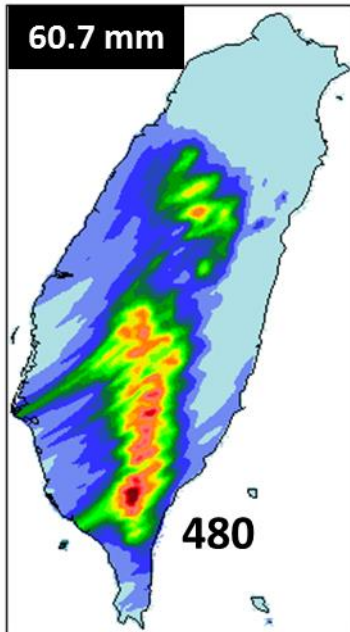
(g) 0807 06Z 6 小時累積降雨
Thompson_31



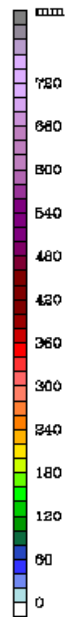
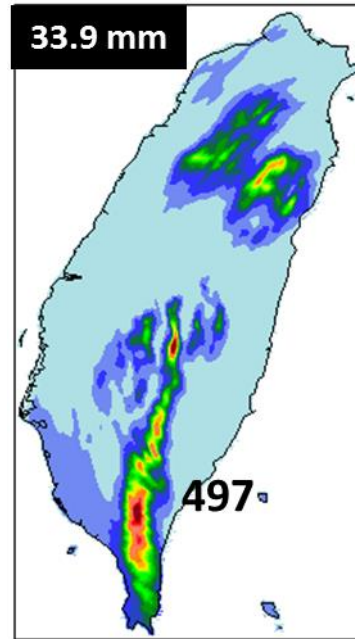
(h) 0808 06Z 6 小時累積降雨
Thompson_31



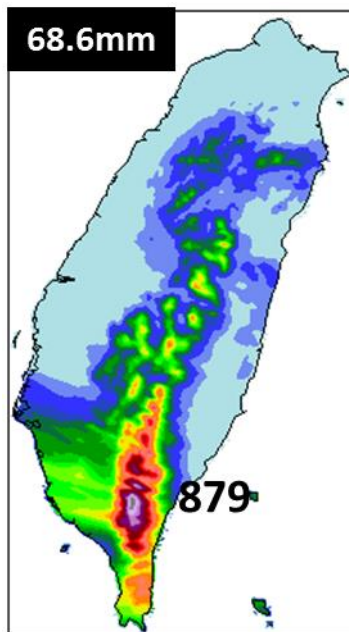
(i) 0809 00Z 6 小時累積降雨
Thompson_31



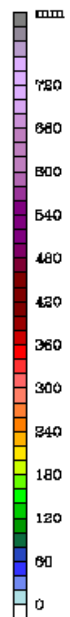
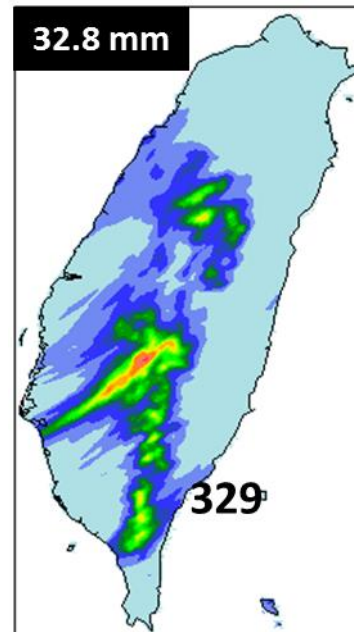
(j) 0807 06Z 6 小時累積降雨
Morrison_31



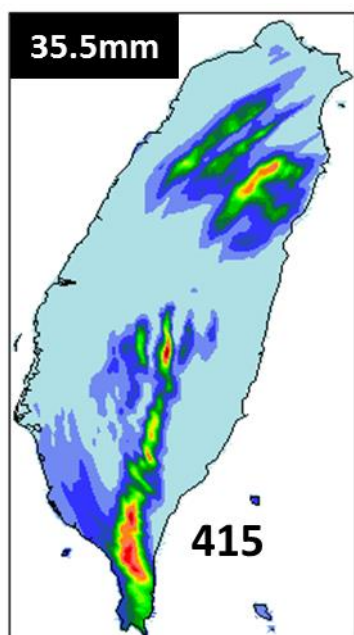
(k) 0808 06Z 6 小時累積降雨
Morrison_31



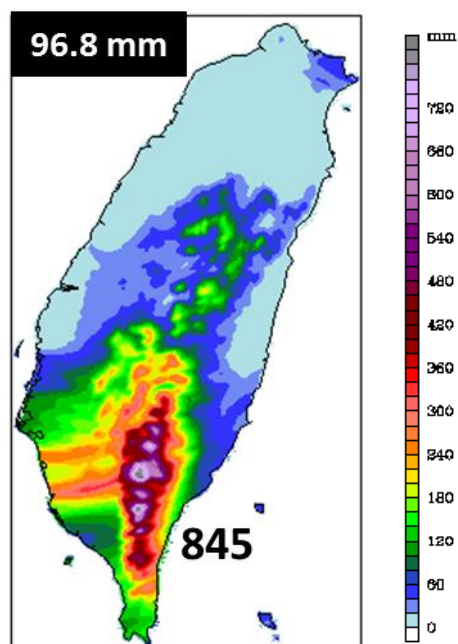
(l) 0809 00Z 6 小時累積降雨
Morrison_31



(m) 0807 06Z 6 小時累積降雨
Milbrandt and Yau_31



(n) 0808 06Z 6 小時累積降雨
Milbrandt and Yau_31



(o) 0809 00Z 6 小時累積降雨
Milbrandt and Yau_31

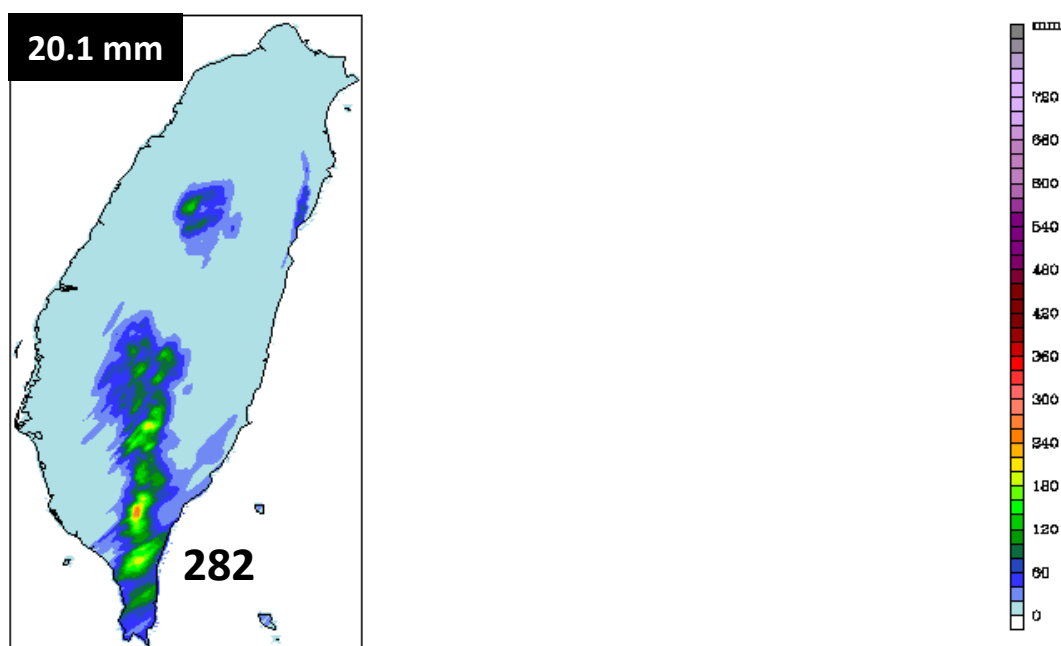


圖 4.45: 觀測與實驗三之 6 小時累積降雨圖，圖(a)(b)(c)、圖(d)(e)(f)、圖(g)(h)(i)、圖(j)(k)(l)、圖(m)(n)(o)分別為觀測、WDM6_31、Thompson_31、Morrison_31 和 Milbrandt and Yau_31 實驗。圖(a)(d)(g)(j)(m)為 2009 年 8 月 7 日 06Z 時，圖(b)(e)(h)(k)(n)為 2009 年 8 月 8 日 06Z 時，圖(c)(f)(i)(l)(o)為 2009 年 8 月 9 日 00Z 時。圖中黑色框框內數字為陸地上 6 小時平均累積雨量。圖上標示的數字是降雨

極大值(mm)。

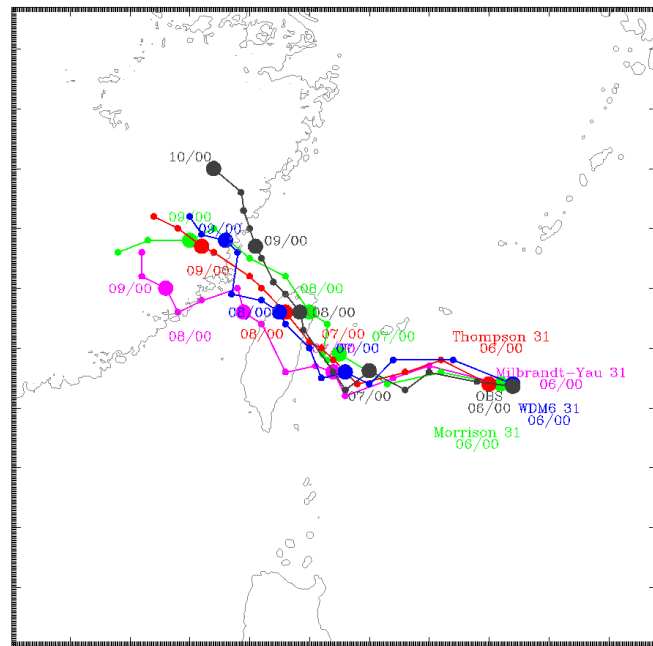


圖 4.46: 觀測(黑色)與實驗三(藍色:WDM6_31、綠色:Morrison_31、紫色:Milbrandt and Yau_31、紅色:Thompson_31)模擬颱風路徑。圖上標示的時間為 UTC 時。

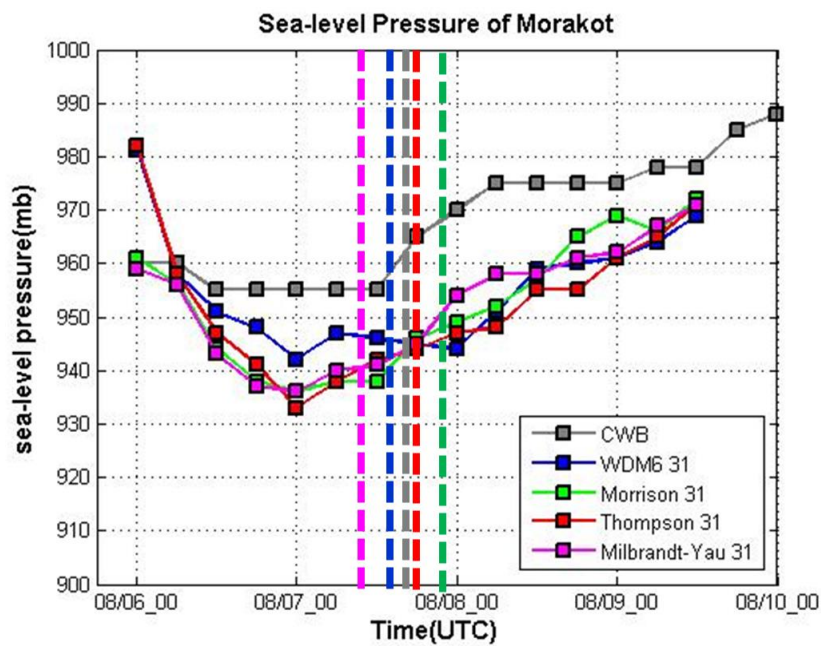


圖 4.47: 觀測(黑色)與實驗三(藍色:WDM6_31、綠色:Morrison_31、紫色:Milbrandt and Yau_31、紅色:Thompson_31)模擬颱風強度，虛線表示登陸台灣時間。圖上標示的時間為 UTC 時。

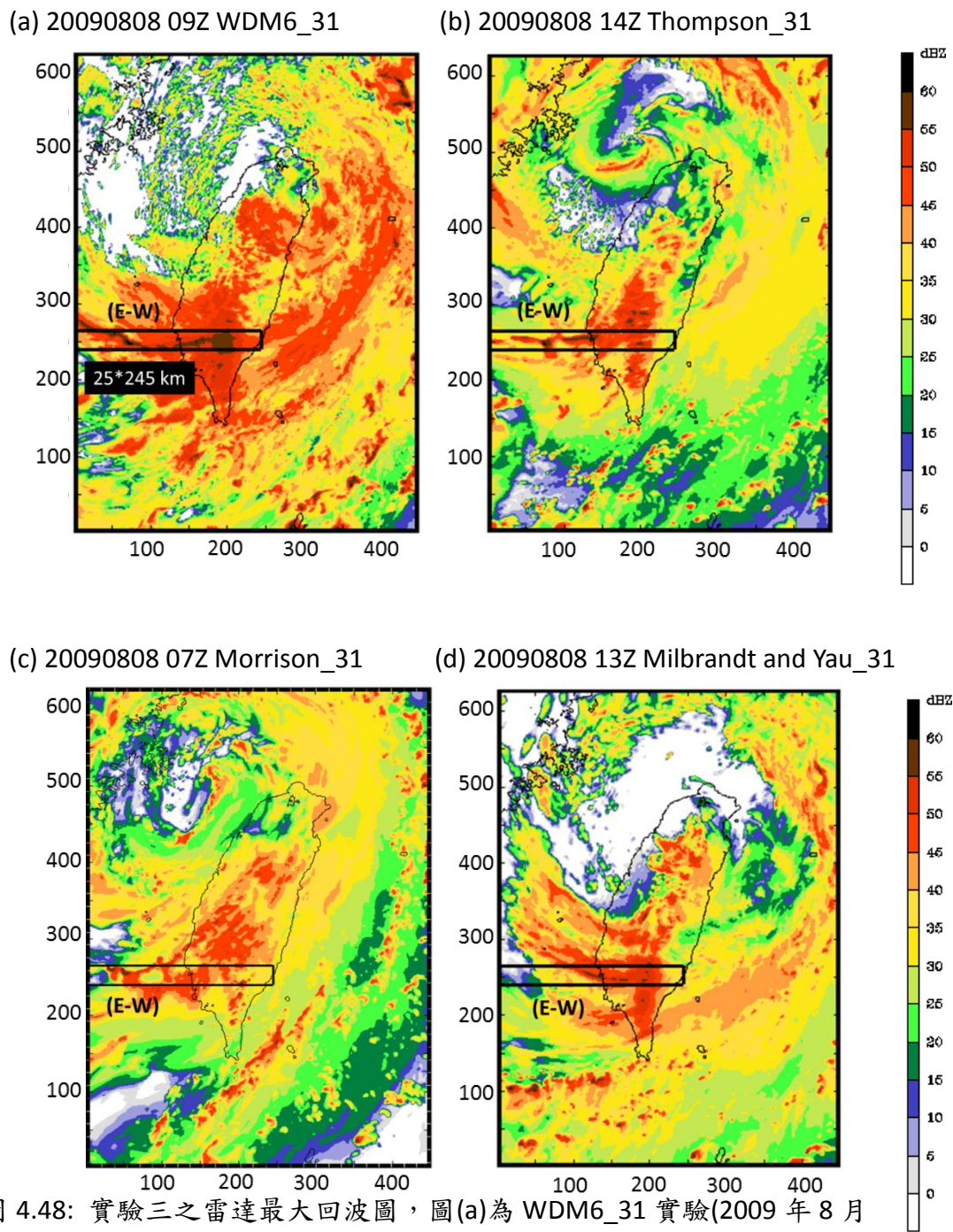
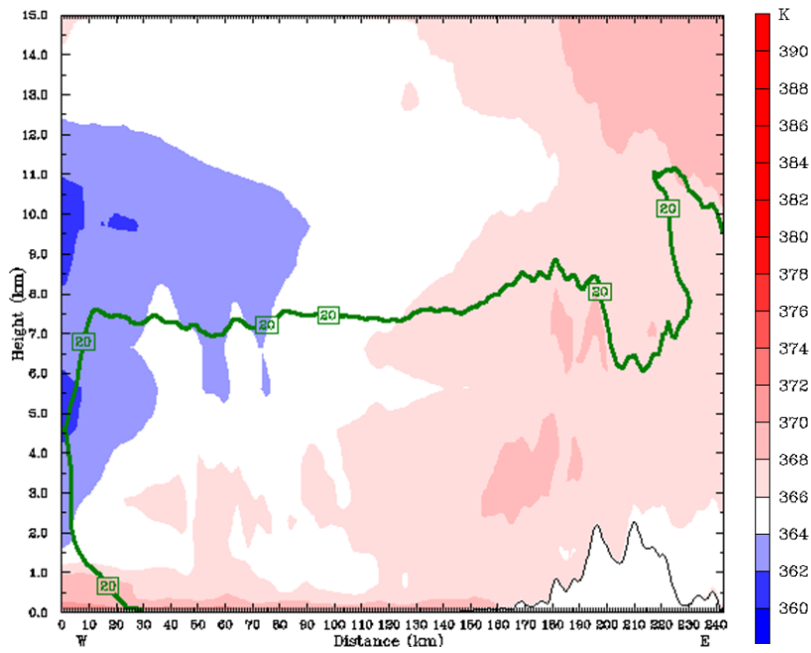
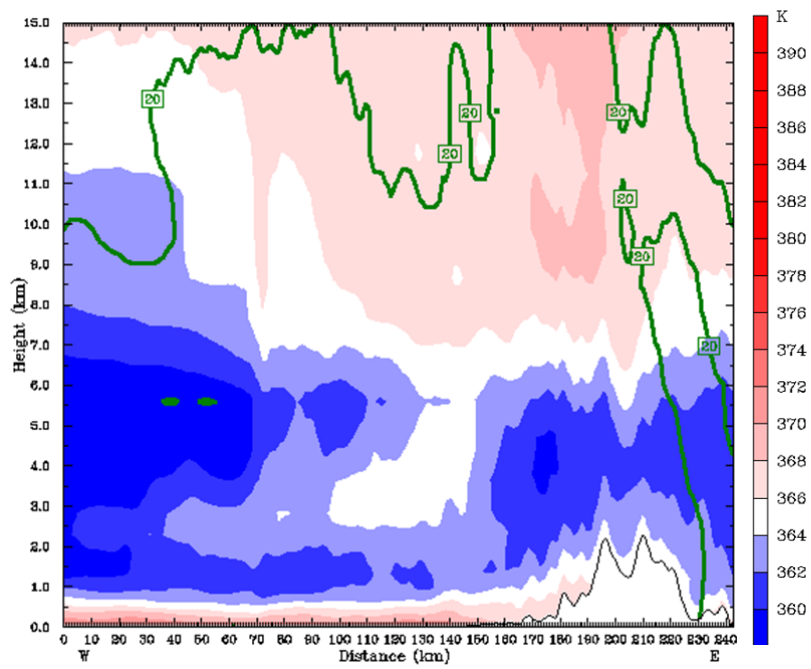


圖 4.48: 實驗三之雷達最大回波圖，圖(a)為 WDM6_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 09Z)，圖(b)為 Thompson_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 14Z)，圖(c)為 Morrison_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 07Z)，圖(d)為 Milbrandt-Yau_31 實驗結果(2009 年 8 月 8 日 13Z)。為颱風在台灣西南部地形迎風面造成強降雨之時。水平軸標示的是距離(km)。

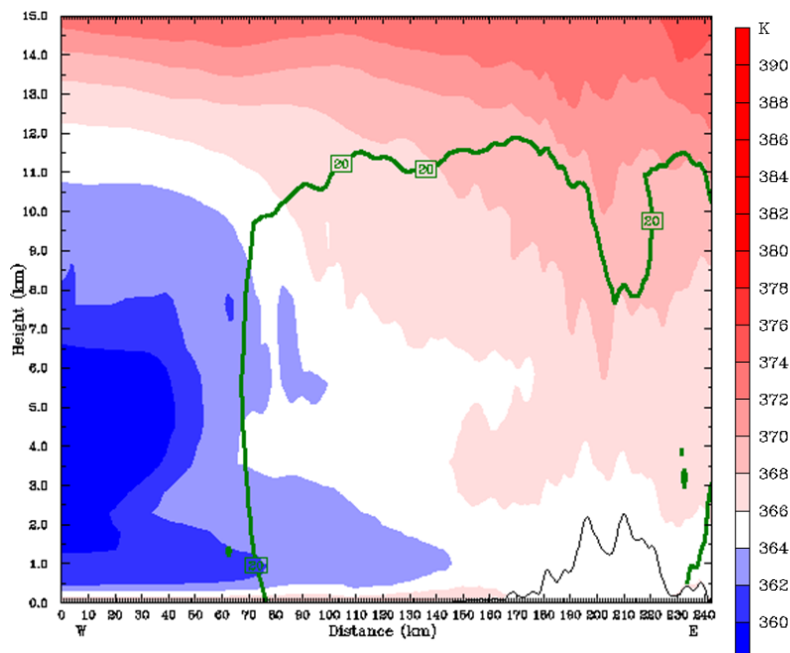
(a) 20090808 09Z WDM6_31



(b) 20090808 14Z Thompson_31



(c) 20090808 07Z Morrison_31



(d) 20090808 13Z Milbrandt and Yau_31

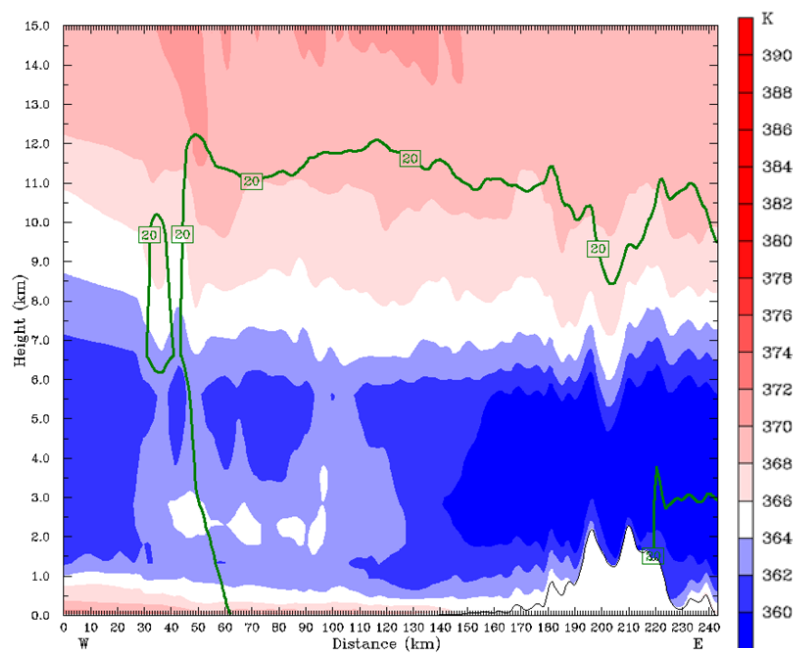
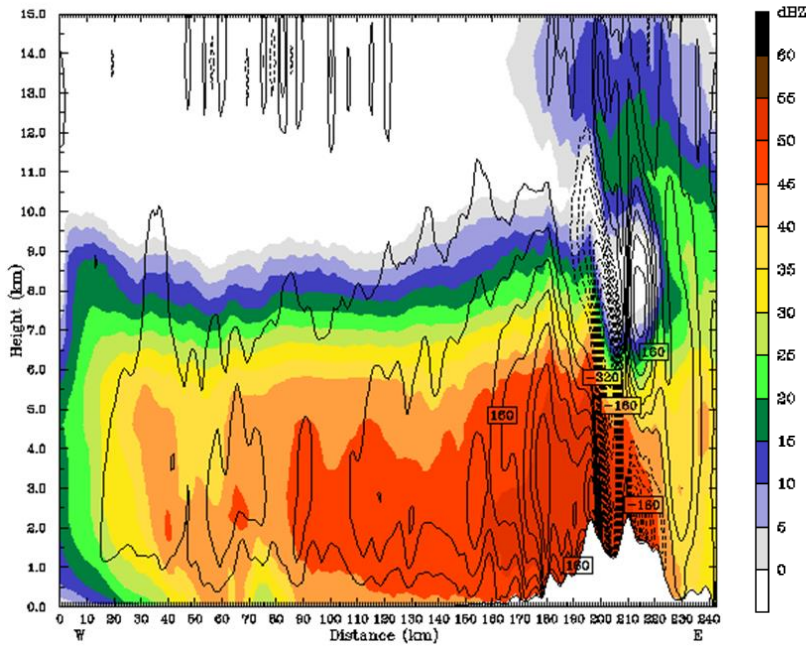
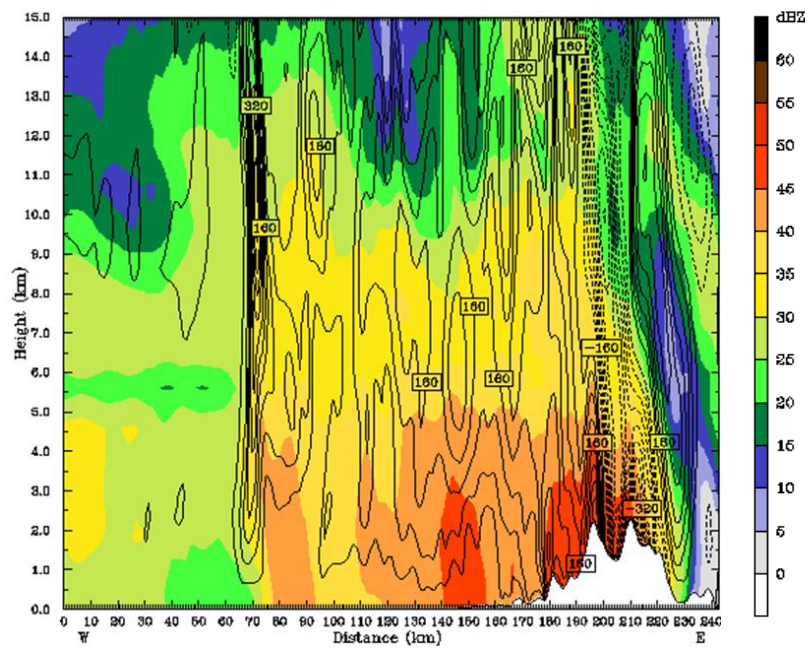


圖 4.49: 圖 4.48 垂直剖面。陰影區表示相當位溫(K), 綠色實線表示雷達回波 20dBZ 等值線。圖(a)為 WDM6_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 09Z), 圖(b)為 Thompson_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 14Z), 圖(c)為 Morrison_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 07Z), 圖(d)為 Milbrandt-Yau_31 實驗結果(2009 年 8 月 8 日 13Z)。

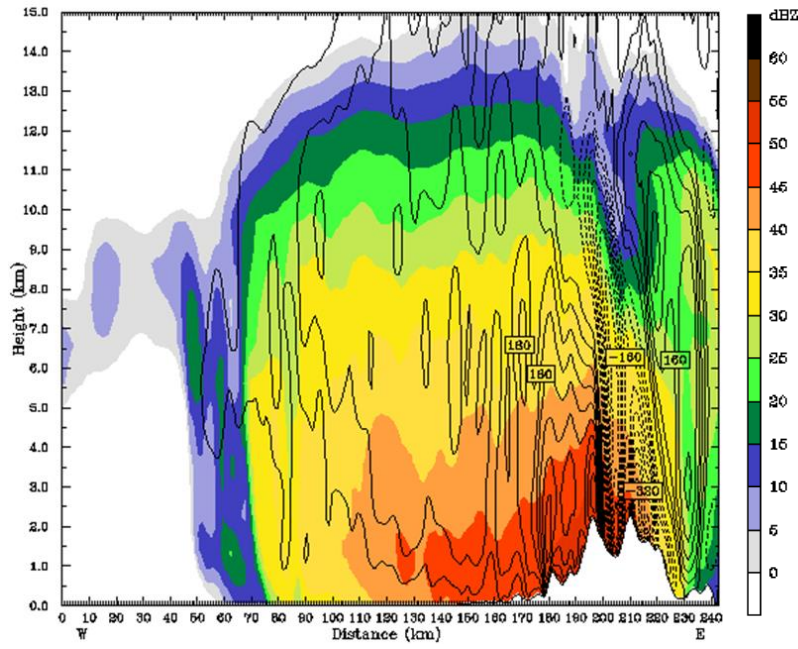
(a) 20090808 09Z WDM6_31



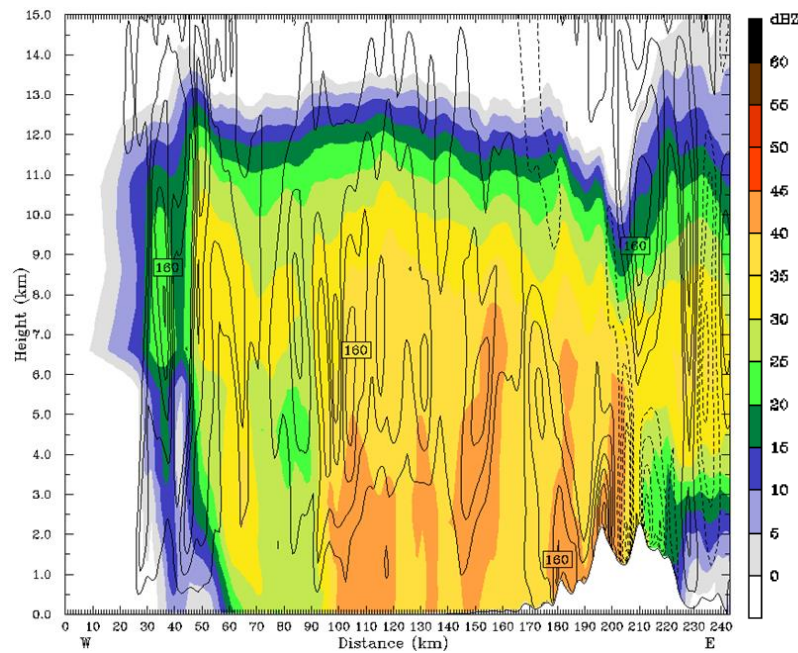
(b) 20090808 14Z Thompson_31



(c) 20090808 07Z Morrison_31



(d) 20090808 13Z Milbrandt and Yau_31



(e) 20090808 21Z OBS

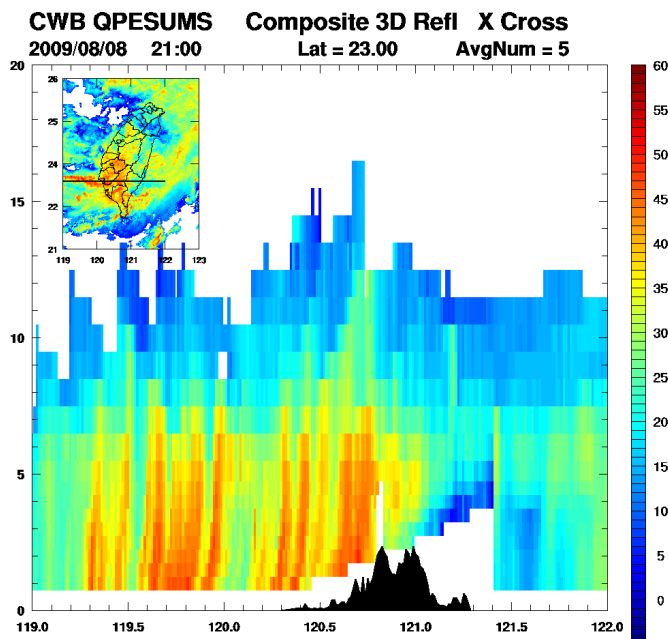
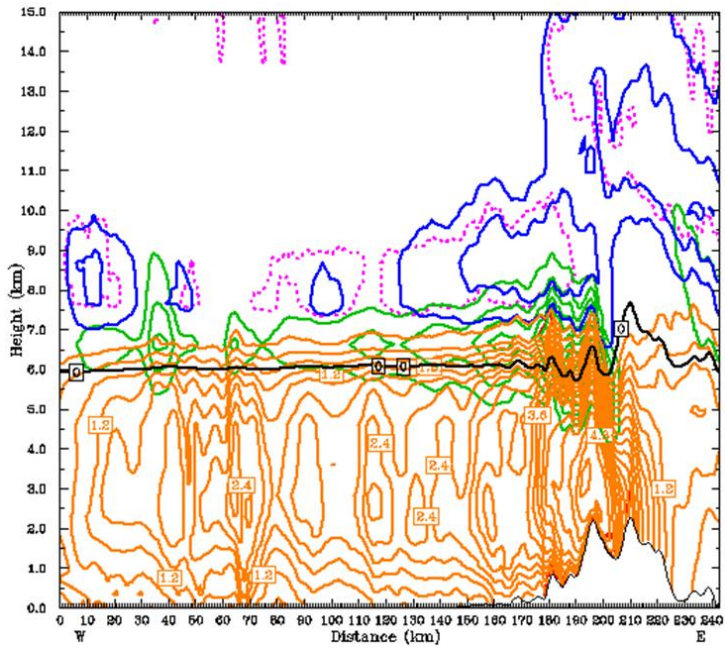
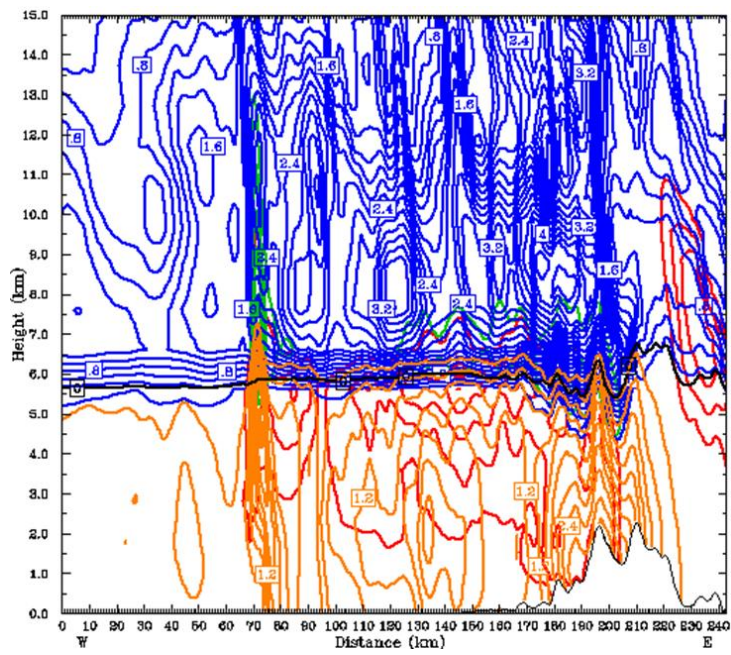


圖 4.50: 圖 4.48 垂直剖面。陰影區表示雷達回波(dBZ)，實線表示正垂直速度(間距:40 cm/s)，虛線表示負垂直速度(間距:40 cm/s)。圖(a)為 WDM6_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 09Z)，圖(b)為 Thompson_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 14Z)，圖(c)為 Morrison_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 07Z)，圖(d)為 Milbrandt-Yau_31 實驗結果(2009 年 8 月 8 日 13Z)。圖(e)為觀測之雷達回波，取自 2010 年莫拉克颱風科學報告，”莫拉克綜觀環境與降雨特徵分析” 部分之圖 15。

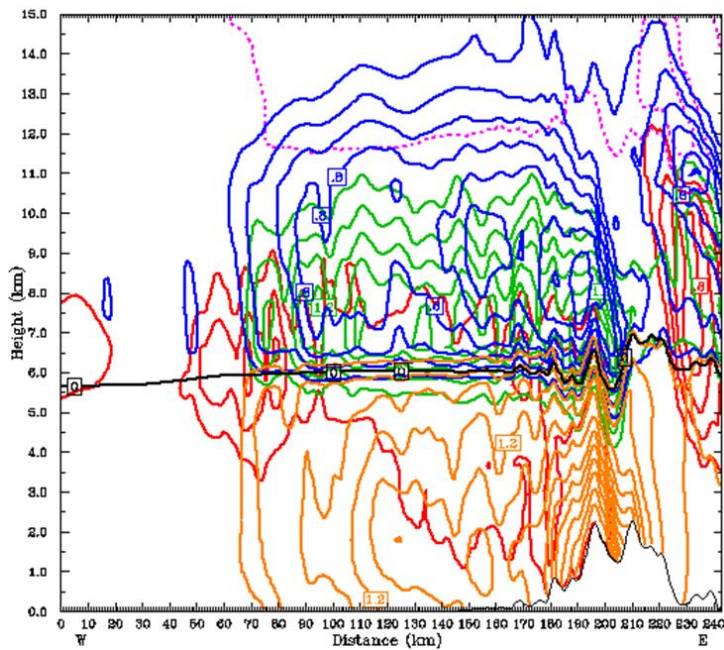
(a) 20090808 09Z WDM6_31



(b) 20090808 14Z Thompson_31



(c) 20090808 07Z Morrison_31



(d) 20090808 13Z Milbrandt and Yau_31

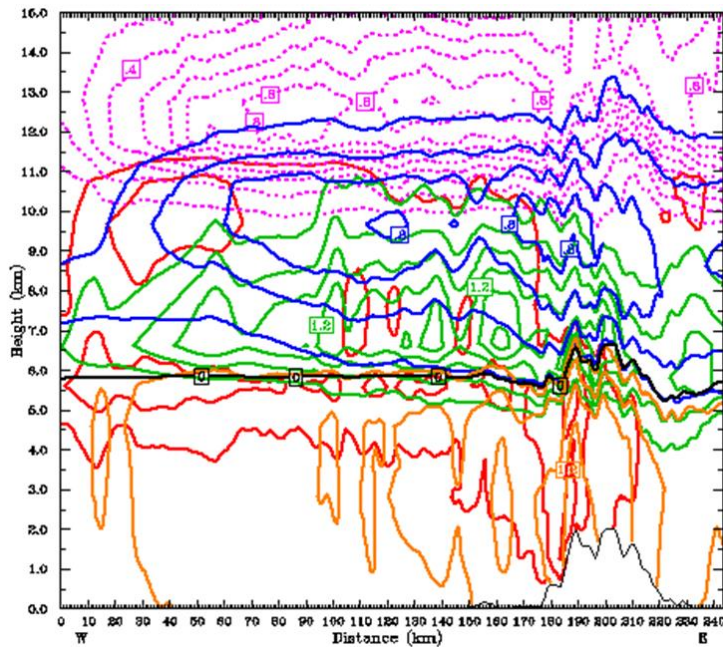


圖 4.51: 圖 4.48 垂直剖面圖。黑色實線表示攝氏 0 度溫度線，紫色實線表示雲冰混合比(間距:0.1g/kg)，紅色實線表示雨水混合比(間距:0.3g/kg)，橘色實線表示雲水混合比(間距:0.2g/kg)，藍色實線表示雪混合比(間距:0.2g/kg)，綠色實線表示軟雹混合比(間距:0.3g/kg)。圖(a)為 WDM6_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 09Z)，圖(b)為 Thompson_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 14Z)，圖(c)為 Morrison_31 實驗(2009 年 8 月 8 日 07Z)，圖(d)為 Milbrandt-Yau_31(2009 年 8 月 8 日 13Z) 實驗結果。