

國立臺灣大學理學院大氣科學研究所

碩士論文

Department of Atmospheric Sciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis



快速增強與緩慢增強颱風雲微物理與降雨類型
之比較研究

A Comparison Study of Rainfall Regimes and Microphysics
Characteristics between Rapidly-Intensifying and Slow-intensifying
Tropical Cyclones

黃詣軒

Yi-Hsuan Huang

指導教授：楊明仁 博士

Advisor: Ming-Jen Yang, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July 2023



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

本論文係 黃詣軒 君 (學號 R09229028) 在國立臺灣大學大氣科學學系、所完成之碩士學位論文，於民國 112 年 6 月 26 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

楊明仁

(簽名)

(指導教授)

郭鴻基

陳正平

劉千義

系主任、所長

游政吉

(簽名)

誌謝

十幾年前，一個小二的學童因緣際會之下接觸到氣象這門學問。快速旋轉的颱風、變化萬千的天氣系統，讓他深深著迷於此門科學。自此便立下進入大氣系就讀及進入氣象局工作的宏願，2015 年臺大大氣營的所見所聞更是確立他未來的夢想路途。如今他用自己十餘年來的努力與機遇，完成小時候這個看似不可能的任務...

大三上自中央大氣系提早畢業後，我便提早一學期來到臺大大氣系這個大家庭。雖然在中國武漢肺炎肆虐之下，讓我這兩年多的研究生生活及學習歷程變得有所不同，課程與研究討論紛紛轉到線上，更有許多令人期待的活動紛紛取消或改期。然而帶著所有來自中央大氣師長的諄諄教誨、同儕的祝福及臺大大氣系這個大家庭所有師長同儕在這兩年多來的相互切磋及學習，我終於順利地完成我的碩士學位了！

首先，我要特別感謝我的指導教授楊明仁老師，不論是在課業研究的討論及處世待人上皆給予我許多寶貴的經驗及成長的養分。幸運的是，就讀碩士班的這兩年內遇到老師主持的 TAHOPE 觀測實驗，讓我有機會進一步提升我天氣分析及英語口說的能力，對我職場的路途更是有大大的幫助。

同時我也要特別感謝我的口試委員們：郭鴻基老師、陳正平老師及劉千義老師，感謝您們細細閱讀我的論文，並在口試的時候給予我修正論文的寶貴建議及未來的研究方向。其中，我要特別感謝劉千義老師，自大學時期便給予我許多接觸衛星資料的機會，讓我有機會比其他同儕更早進入研究室，獲得許多做研究、分析問題以及提升程式撰寫的能力。

我也要特別感謝對流與降水實驗室的夥伴們，不論是曜竹學長、茂正學長、尚恩學長、炯恩學長、世暘學長、玉來學長、若瑜學姊、日軒學長、偉庭學長（課長）還有我碩一的好夥伴文海及優秀的學弟九令。不論是我程式撰寫有問題的時候、跑 WRF 遇到問題的時候、遇到不會處理的研究議題需要討論的時候、看到

有趣的天氣現象想要一起分享的時候，還有好多好多的寶貴時光，感謝有你們讓我的碩士生涯如此充實而有意義。

在此也要一起從中央來到臺大的好夥伴們：明翰、竹珈、建泓以及俊宇。感謝你們在這幾年來與我一起討論天氣，吃遍中央及臺大附近的美食（中央好像很少美食）。其中明翰更是我這兩年的好室友，感謝有你一起打世紀帝國、一起早起上課、一起搭車回租屋處、買生活用品，讓我的生活更加精采豐富。

再來我想好好謝謝與我一起多次擔任天氣學助教的茂正學長、銘妊學姊以及一起討論進步的 B07、B08 及 B09 學弟妹們，天氣學是一門需要大量經驗累積才能有所進步的課程，它不僅僅是背背公式、記考古題的一門課，它更需要無數的天氣個案經驗累積，並經過同儕之間的充分討論，才能真正理解我們生活周遭一切天氣現象背後的真諦。感謝願意一起學習進步的夥伴們，在當助教的四學期裡，我不僅鍛鍊了講課的技巧，在與你們討論的過程中獲得許多珍貴的經驗，化成我未來持續進步的養分。

在碩士班二年級的暑假，我意外地考上了氣象高考，成為氣象局衛星中心的一員，感謝所有長官及同仁的支持，讓我在工作之餘還有辦法完成我的碩士論文。感謝純珉學姊、世暘學長，你們現在不僅是我的好同學，更是我未來漫長公務生涯的好同事。

最後，我想感謝我的家人，感謝您們提供了我一個衣食無憂的生活環境，讓我可以功讀書，考取理想中的大氣科學系，支持我追尋我的大氣夢，成為真正的天氣之子。

摘要

我們對於快速增強 (Rapid Intensification; RI) 和緩慢增強 (Slow Intensification; SI) 颱風之間的降雨類型和雲微物理特徵的差異與演變目前的認知有限。為討論此議題，我們不僅分析了 SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) 儀器反演的冰水路徑 (Ice Water Path; IWP) 和雨水路徑 (Rain Water Path; RWP) 及紅外頻道的亮溫 (Brightness Temperature)，還進行了 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式模擬，以討論 RI 和 SI 的颱風之間降雨類型和雲微物理特徵的差異與演變。此外，我們分別針對 RI 和 SI 個案使用 WRF 模式進行暖雲和冷雲微物理方案的影響敏感度測試。

從 SSMIS 觀測中，我們發現在 2 倍最大風速半徑 (RMW) 以內，RI 颱風的 IWP 和 RWP 的量值在增強開始前 12 小時之後大於 SI 颱風的量值。且在增強開始前 12 小時和增強開始後的 12 及 24 小時，IWP 和 RWP 在 2 倍 RMW 內，95% 的信心水準下 RI 颱風顯著多於 SI 颱風的量值。而紅外頻道的亮溫則指出：在增強前 12 小時的時候，颱風 3RMW 內的區域 RI 颱風個案的亮溫低於 SI 的颱風個案，並於增強開始後 2RMW 內多數區域紅外的亮溫於 95% 的信心水準下 RI 颱風顯著低於 SI 颱風的量值，尤其是在上風切處格外顯著。

不論是在 SSMIS 觀測或 WRF 模擬結果，我們發現颱風增強開始前 IWP 和 RWP 在下風切處量值大於上風切處，其中又以 Downshear Left (DL) 象限的量值最大。RI 開始後，Upshear Left (UL) 象限中的 IWP 和 RWP 逐漸增大，但是 SI 的颱風並沒有出現類似的演變。同時我們亦發現 RI 颱風個案在其 RI 正要開始前，IWP 與 RWP 及對流有發生快速減弱的情形。

在 WRF 控制組模擬 RI 和 SI 個案降水類型的差異比較中，我們發現進行分析的大多數時段中，RI 颱風個案中 DL 和 UL 象限的深對流 (DC) 和中等對流 (MC) 的比率大於 SI 颱風個案的比率。同時資料顯示，不論 RI 或 SI 的颱風個案其上風切處的層狀降水 (ST) 面積，均在增強 (RI/SI) 開始的前後有逐漸增加的情

形。

在暖雲敏感度模擬實驗中，我們發現 RI 颱風個案其 RI 開始的時間明顯提前，而 SI 颱風個案則沒有發生類似現象。暖雲實驗指出，RI 和 SI 的個案在增強 (RI/SI) 開始後其對流強度均不及控制組的對流強度，且暖雲實驗中 ST 和 WE 的面積高於控制組的面積，此情形在颱風的上風切處格外顯著。

關鍵字：快速增強、緩慢增強、冰水路徑、雨水路徑、降雨類型

Abstract

The differences and evolution of rainfall regimes and microphysics characteristics between rapidly-intensifying (RI) and slowly-intensifying (SI) tropical cyclones (TCs) are not well discussed understood. Owing to this predicament, we analyzed the ice water path (IWP) and rain water path (RWP) retrieved from the Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS), brightness temperature from infrared channel, and conducted the Weather Research and Forecasting model (WRF) simulations to examine the differences and evolution of rainfall regimes and microphysics characteristics between RI and SI TCs. To clarify the influences by warm-rain and cold-rain microphysics schemes, we also conducted sensitivity tests with the WRF model on RI and SI cases, respectively.

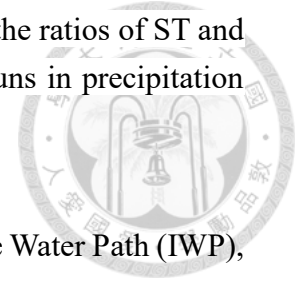
From the SSMIS observations, we found that the IWP and RWP in RI TCs were greater than those in SI TCs within twice the radius of maximum wind speed (RMW) 12 hours before the intensification onset. The differences in IWP and RWP between RI and SI TCs within the RMW were significant at the 95% confidence level at the intensification onset and within twice the RMW at 12 hours before, 12 hours after, and 24 hours after the intensification onset. The brightness temperature analysis of infrared channel indicated that, at 12 hours before intensification onset, the brightness temperature of the RI cases was lower than that of the SI cases within 3RMW. After the onset of intensification, the RI cases exhibited significantly lower infrared brightness temperatures compared to the SI cases at the 95% confidence level within most of the area of 2RMW. This difference was particularly prominent in the upshear quadrant.

Both the SSMIS observations and WRF simulations showed that the IWP and RWP were generally larger in the downshear flank before the intensification onset, especially in the downshear left (DL) quadrant. The IWP and RWP in upshear left (UL) quadrant gradually became larger after the RI onset, yet similar evolution did not occur in SI TCs. The IWP and RWP were quickly weakened just before the RI onset in RI TCs.

We also compared the differences of precipitation regimes between RI and SI TCs. We found that the ratios of deep convection (DC) and moderate convection (MC) at DL and UL quadrants in RI TCs were greater than those in SI TCs for most periods we analyzed. The ratios of stratiform precipitation (ST) at UL and upshear right (UR) quadrants gradually increased after the RI and SI onset when we analyzed precipitation type including non-precipitating grids.

From the warm-rain sensitivity tests, we found that the timing of the RI onset significantly occurred earlier while the same consequence did not occur in SI case. We not only demonstrated that the precipitation intensity and convection were weaker in

both RI and SI case after intensification began, but also found that the ratios of ST and WE were greater in warm rain experiment than those in control runs in precipitation type analysis.



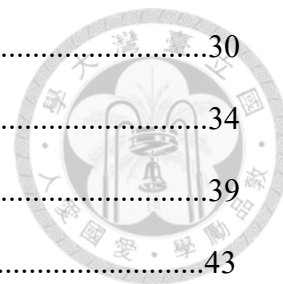
Keywords: Rapid Intensification (RI), Slow Intensification (SI), Ice Water Path (IWP), Rain Water Path (RWP), rainfall regimes

目錄



國立臺灣大學碩士學位論文口試委員審定書.....	i
誌謝.....	ii
摘要.....	iv
英文摘要.....	vi
目錄.....	viii
表目錄.....	x
圖目錄.....	xi
第一章、緒論.....	1
1.1 文獻回顧.....	1
1.2 研究動機.....	3
1.3 論文架構.....	3
第二章、研究方法.....	5
2.1 衛星資料處理與介紹.....	5
2.2 颱風路徑強度與最大風速半徑.....	6
2.3 再分析資料與風切計算.....	7
2.4 WRF 模式設定.....	7
2.5 降雨類型分類與軸對稱性計算.....	9
2.6 颱風個案背景介紹.....	11
第三章、SSMIS 衛星資料與 WRF 模式控制組比較分析.....	12
3.1 SSMIS 衛星資料合成分析之比較.....	12
3.2 SSMIS 衛星資料與 WRF 模擬之比較.....	15
3.3 WRF 模擬控制組 RI 與 SI(未伴隨 RI 之個案)之結果比較.....	19
3.4 WRF 模擬控制組 RI 與 SI(伴隨 RI 之個案)之結果比較.....	27
第四章、冷暖雲微物理參數法敏感度實驗.....	30

4.1 WRF 冷暖雲微物理參數法 RI 個案之比較.....	30
4.2 WRF 冷暖雲微物理參數法 SI 個案之比較.....	34
第五章、結論.....	39
參考文獻.....	43
表.....	48
圖.....	54



表目錄



表 3-1 SSMIS 衛星合成 RI 個案列表。由左至右排序，第一行為颱風之中文譯名及英文名稱及其活躍年份，第二行為其生命期內單日最大增強速率，第三行則為其生命期內最高十米風值。

表 3-2 SSMIS 衛星合成 RI 個案列表。時間由左至右排序分別為 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 24 小時、RI 後 24 小時，此表顯示不同時間點合成的颱風列表。

表 3-3 SSMIS 衛星合成 RI 個案之 RMW(單位為 km)。時間由左至右排序分別為 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 24 小時、RI 後 24 小時。

表 3-4 SSMIS 衛星合成 SI 個案列表。由左至右排序，第一行為颱風之中文譯名及英文名稱及其活躍年份，第二行為其生命期內單日最大增強速率，第三行則為其生命期內最高十米風值。

表 3-5 SSMIS 衛星合成 SI 個案列表。時間由左至右排序分別為 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 24 小時、SI 後 24 小時，此表顯示不同時間點合成的颱風列表。

表 3-6 SSMIS 衛星合成 RI 個案之 RMW(單位為 km)。時間由左至右排序分別為 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 24 小時、SI 後 24 小時。

圖目錄



圖 2-1 風切向量座標示意圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓左半側(即向量指向)，為下風切處而在風切向量左側之象限稱為 Down Shear Left (DL)，風切向量右側之象限稱為 Down Shear Right (DR)，而圖中同心圓右半側為上風切處，而在風切向量左側之象限稱為 Up Shear Left (UL)，風切向量右側之象限稱為 Up Shear Right (UR)。同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。

圖 2-2 RI 颱風個案蘇力基巢狀網域設計

圖 2-3 SI 颱風個案珊珊巢狀網域設計

圖 3-1 SSMIS 衛星 RI 個案 IWP 合成分析圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-2 SSMIS 衛星 SI 個案 IWP 合成分析圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-3 SSMIS 衛星 RI 個案 RWP 合成分析圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-4 SSMIS 衛星 SI 個案 RWP 合成分析圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-5 SSMIS 衛星 RI 與 SI 個案分別經合成分析後 IWP 差值。色塊顏色表 RI-SI 後之差值。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。黑點表該處經統計檢定後，在 95%信心水準下具有統計上差異性。(a)增強前 24 小時、(b)增強前 12 小時、(c)增強開始、(d)增強後 12 小時、(e)增強後 24 小時。

圖 3-6 SSMIS 衛星 RI 與 SI 個案分別經合成分析後 RWP 差值。色塊顏色表 RI-SI 後之差值。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。黑點表該處經統計檢定後，在 95%信心水準下具有統計上差異性。(a)增強前 24 小時、(b)增強前 12 小時、(C)增強開始、(d)增強後 12 小時、(e)增強後 24 小時。

圖 3-7 RI 個案紅外波段亮溫合成分析。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(C)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-8 SI 個案紅外波段亮溫合成分析。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(C)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-9 RI 與 SI 個案分別經合成分析後其紅外波段亮溫差異。色塊顏色表 RI-SI 後之差值。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。黑點表該處經統計檢定後，在 95%信心水準下具有統計上差異性。(a)增強前 24 小時、(b)增強前 12 小時、(C)增強開始、(d)增強後 12 小時、(e)增強後 24 小時。

圖 3-10 SSMIS 觀測 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(C)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-11 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(C)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-12 SSMIS 觀測 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(C)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-13 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(C)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-14 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 LHF。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-15 SSMIS 觀測 SI 個案珊珊颱風(2018)之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-16 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-17 SSMIS 觀測 SI 個案珊珊颱風(2018)之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-18 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-18 SSMIS 衛星觀測蘇力基颱風(2021)與珊珊颱風(2018)之 3RMW 內 IWP 及 RWP 軸對稱率時序圖。X 軸表相對於增強(RI/SI)開始當下的時間對應關係，Y 軸表軸對稱率之量值。藍實線表蘇力基颱風 IWP 之軸對稱率，藍虛線表珊珊颱風 IWP 之軸對稱率，紅實線表蘇力基颱風 RWP 之軸對稱率，紅虛線表珊珊颱風 RWP 之軸對稱率。

圖 3-19 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2021)之 LHF。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-20 SSMIS 衛星觀測蘇力基颱風(2021)與珊珊颱風(2018)之 3RMW 內 IWP 及 RWP 軸對稱率時序圖。X 軸表相對於增強(RI/SI)開始當下的時間對應關係，Y 軸表軸對稱率之量值。藍實線表蘇力基颱風 IWP 之軸對稱率，藍虛線表珊珊颱風 IWP 之軸對稱率，紅實線表蘇力基颱風 RWP 之軸對稱率，紅虛線表珊珊颱風 RWP 之軸對稱率。

圖 3-21 WRF 模式模擬蘇力基颱風(2021)與珊珊颱風(2018)之 3RMW 內 IWP 及 RWP 軸對稱率時序圖。X 軸表相對於增強(RI/SI)開始當下對應關係，Y 軸表軸對稱率之量值。藍實線表蘇力基颱風 IWP 之軸對稱率，藍虛線表珊珊颱風 IWP 之軸對稱率，紅實線表蘇力基颱風 RWP 之軸對稱率，紅虛線表珊珊颱風 RWP 之軸對稱率。



圖 3-22 蘇力基颱風(2021)10 米風極大值時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 10 米風之量值。橘線表 WRF 模擬之颱風 10 米風極大值，藍線表 best track 提供之颱風 10 米風極值。橘粗垂直線表 WRF 模擬中颱風 RI 開始的時間點，藍粗垂直線表 best track 中颱風 RI 開始的時間點。

圖 3-23 蘇力基颱風(2021)路徑圖。橘線表 WRF 模擬之路徑，藍線表 best track 提供之颱風路徑，倒三角形表 best track 每日 00Z 之中心定位，正五邊形表 WRF 模擬中每日 00Z 之中心定位。

圖 3-24 珊珊颱風(2018)10 米風極大值時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 10 米風之量值。橘線表 WRF 模擬之颱風 10 米風極大值，藍線表 best track 提供之颱風 10 米風極值。橘粗垂直線表 WRF 模擬中颱風 SI 開始的時間點，藍粗垂直線表 best track 中颱風 SI 開始的時間點。

圖 3-25 珊珊颱風(2018)路徑圖。橘線表 WRF 模擬之路徑，藍線表 best track 提供之颱風路徑，倒三角形表 best track 每日 00Z 之中心定位，正五邊形表 WRF 模擬中每日 00Z 之中心定位。

圖 3-26 IWP 哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均 IWP 量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)蘇力基颱風、(b)珊珊颱風。

圖 3-27 RWP 哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均 IWP 量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)蘇力基颱風、(b)珊珊颱風。

圖 3-28 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之軸對稱平均 IWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-29 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之軸對稱平均 IWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-30 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小

時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-31 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。



圖 3-32 RI 個案蘇力基颱風(2021)潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 RI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。

圖 3-33 SI 個案珊珊颱風(2021)潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 SI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。

圖 3-34 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 3-35 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 3-36 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該向限總降水格點之比例。深紅實線表 RI 個案 DC 比例，橘色實線表 RI 個案 MC 比例，黃色實線表 RI 個案 SC 比例，深紅虛線表 SI 個案 DC 比例，橘色虛線表 SI 個案 MC 比例，黃色虛線表 SI 個案 SC 比例。

圖 3-37 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該向限總降水格點之比例。綠實線表 RI 個案 ST 比例，藍色實線表 RI 個案 WE 比例，綠虛線表 SI 個案 ST 比例，藍色虛線表 SI 個案 WE 比例。

圖 3-38 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該向限總格點之比例。深紅實線表 RI 個案 DC 比例，橘色實線表 RI 個案 MC 比例，黃色實線表 RI 個案 SC 比例，深紅虛線表 SI 個案 DC 比例，橘色虛線表 SI 個案 MC 比例，黃色虛線表 SI 個案 SC 比例。

圖 3-39 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該向限總格點之比例。綠實線表 RI 個案 ST 比例，藍色實線表 RI 個案 WE 比例，綠虛線表 SI 個案 ST 比例，藍色虛線表 SI 個案 WE 比例。



圖 3-40 WRF 模式模擬蘇力基颱風(2021)SI 期間之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

圖 3-41 WRF 模式模擬蘇力基颱風(2021)SI 期間之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

圖 3-42 WRF 模式蘇力基颱風(2021)SI 期間之之軸對稱平均 IWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

圖 3-43 WRF 模式蘇力基颱風(2021)SI 期間之之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

圖 3-44 蘇力基颱風(2021) SI 期間潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 SI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。

圖 3-45 蘇力基颱風 SI 期間哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)IWP、(b)RWP。

圖 3-46 WRF 模式模擬蘇力基颱風(2021)SI 期間之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

圖 3-47 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。深紅實線表蘇力基颱風 RI 期間 DC 比例，橘色實線表蘇力基颱風 RI 期間 MC 比例，黃色實線表蘇力基颱風 RI 期間 SC 比例，深紅虛線表蘇力基颱風 SI 期間 DC 比例，橘色虛線表蘇力基颱風 SI 期間 MC 比例，黃色虛線表蘇力基颱風 SI 期間 SC 比例。

圖 3-48 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。綠實線表蘇力基颱風 RI 期間 ST 比例，藍色實線表蘇力基颱風 RI 期間 WE 比例，綠虛線表蘇力基颱風 SI 期間 ST 比例，藍色虛線表蘇力基颱風 SI 期間 WE 比例。

圖 4-1 蘇力基颱風(2021)10 米風極大值時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 10 米風之量值。橘線表 WDM6 模擬之颱風 10 米風極大值，藍線表 Kessler 模擬之颱風 10 米風極值。橘粗垂直線表 WDM6 模擬中颱風 RI 開始的時間點，藍粗垂直線表 Kessler 模擬之颱風 RI 開始的時間點。

圖 4-2 蘇力基颱風(2021)RMW 時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 RMW 之量值。橘線表 WDM6 模擬之 RMW，藍線表 Kessler 模擬之 RMW。橘粗垂直線表 WDM6 模擬中颱風 RI 開始的時間點，藍粗垂直線表 Kessler 模擬之颱風 RI 開始的時間點。

圖 4-3 蘇力基颱風 RWP 哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均 IWP 量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)Kessler scheme、(b)WDM6 scheme。

圖 4-4 WRF 模式暖雲實驗組 RI 個案蘇力基颱風(2021)之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 4-5 RI 個案蘇力基颱風(2021)RWC 取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 RI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。(a)Kessler scheme、(b)WDM6 scheme。

圖 4-6 RI 個案蘇力基颱風(2021)潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 RI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。(a)Kessler scheme、(b)WDM6 scheme。

圖 4-7 WRF 模式暖雲實驗組 RI 個案蘇力基颱風(2021)之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

圖 4-8 RI 個案蘇力基颱風(2021)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該向限總降水格點之比例。深紅實線表控制組 DC 比例，橘色實線表控制組 MC 比例，黃色實線表控

制組 SC 比例，深紅虛線表暖雲實驗組 DC 比例，橘色虛線表暖雲實驗組 MC 比例，黃色虛線表暖雲實驗組 SC 比例。

圖 4-9 RI 個案蘇力基颱風(2021)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該向限總降水格點之比例。綠實線表控制組 ST 比例，藍色實線表控制組 WE 比例，綠虛線表暖雲實驗組 ST 比例，藍色虛線表暖雲實驗組 WE 比例。

圖 4-10 RI 個案蘇力基颱風(2021)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該向限總格點之比例。深紅實線表控制組 DC 比例，橘色實線表控制組 MC 比例，黃色實線表控制組 SC 比例，深紅虛線表暖雲實驗組 DC 比例，橘色虛線表暖雲實驗組 MC 比例，黃色虛線表暖雲實驗組 SC 比例。

圖 4-11 RI 個案蘇力基颱風(2021)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該向限總格點之比例。綠實線表控制組 ST 比例，藍色實線表控制組 WE 比例，綠虛線表暖雲實驗組 ST 比例，藍色虛線表暖雲實驗組 WE 比例。

圖 4-12 珊珊颱風(2018)10 米風極大值時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 10 米風之量值。橘線表 WSM6 模擬之颱風 10 米風極大值，藍線表 Kessler 模擬之颱風 10 米風極值。橘粗垂直線表 WSM6 模擬中颱風 SI 開始的時間點，藍粗垂直線表 Kessler 模擬之颱風 SI 開始的時間點。

圖 4-13 珊珊颱風(2018)RMW 時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 RMW 之量值。橘線表 WSM6 模擬之 RMW，藍線表 Kessler 模擬之 RMW。橘粗垂直線表 WSM6 模擬中颱風 SI 開始的時間點，藍粗垂直線表 Kessler 模擬之颱風 SI 開始的時間點。

圖 4-14 珊珊颱風 RWP 哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均 IWP 量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)Kessler scheme、(b)WSM6 scheme。

圖 4-15 WRF 模式暖雲實驗組 SI 個案珊珊颱風(2021)之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12

小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 4-16 SI 個案珊珊颱風(2018)潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 SI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。(a)Kessler scheme、(b)WSM6 scheme。

圖 4-17 WRF 模式暖雲實驗組 SI 個案珊珊颱風(2018)之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

圖 4-18 SI 個案珊珊颱風(2018)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 SI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總降水格點之比例。深紅實線表控制組 DC 比例，橘色實線表控制組 MC 比例，黃色實線表控制組 SC 比例，深紅虛線表暖雲實驗組 DC 比例，橘色虛線表暖雲實驗組 MC 比例，黃色虛線表暖雲實驗組 SC 比例。

圖 4-19 SI 個案珊珊颱風(2018)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 SI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總降水格點之比例。綠實線表控制組 ST 比例，藍色實線表控制組 WE 比例，綠虛線表暖雲實驗組 ST 比例，藍色虛線表暖雲實驗組 WE 比例。

圖 4-20 SI 個案珊珊颱風(2018)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 SI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。深紅實線表控制組 DC 比例，橘色實線表控制組 MC 比例，黃色實線表控制組 SC 比例，深紅虛線表暖雲實驗組 DC 比例，橘色虛線表暖雲實驗組 MC 比例，黃色虛線表暖雲實驗組 SC 比例。

圖 4-21 SI 個案珊珊颱風(2018)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。綠實線表控制組 ST 比例，藍色實線表控制組 WE 比例，綠虛線表暖雲實驗組 ST 比例，藍色虛線表暖雲實驗組 WE 比例。

圖 5-1 RI 與 SI 颱風雲微物理參數及降水類型概念模式圖。

第一章、緒論



1.1 文獻回顧

一般而言，颱風的強度演變往往受到其所處之環境與其本身內部動力因素影響。許多大氣環境條件皆會影響到颱風的強度，例如：颱風所處的環境垂直風切、海表溫度、海洋熱焓量或是環境的水氣量等(Kaplan and DeMaria 2003; Emanuel et al. 2004; Kaplan et al. 2010)。正壓不穩定度與眼牆動力等此類颱風內之動力機制亦對於颱風強度有一定程度之影響(Montgomery and Kallenbach 1997; Schubert et al. 1999; Hendricks et al. 2010)。上述之環境與颱風內部動力因素很大程度影響了颱風內部潛熱釋放的數量與位置，進而影響到颱風的增強過程。

Kaplan and DeMaria(2003)統計大西洋颶風之強度變化，並根據颱風在 24 小時內之 10 米風變化(ΔV)分類颱風之增強速率，定義颱風在 24 小時內增強超過 30 節(knot;kt)為颱風快速增強之閾值。後人研究進一步將增強速率分為四等級，分別為快速增強(Rapid Intensification, RI ; $\Delta V > 30$ kt)、緩慢增強(Slow Intensification, SI ; $30 \text{ kt} > \Delta V > 10$)、無顯著變化(Neutral, NT ; $10 \text{ kt} > \Delta V > -10$)及減弱(Weakening, WK ; $\Delta V < -10$ kt)等級(Fischer et al. 2018; Shi and Chen 2021)。

Yanai et al.(1973)指出在對流系統上升運動處，潛熱的釋放與水氣的凝結是同時發生的，且潛熱釋放量與水氣凝結量成正比。潛熱的釋放與颱風的增強、降水之間的關係更是直接受到颱風內部雲微物理過程影響(Lord et al. 1984; Wang et al. 2020; Homeyer et al. 2021)。然而幾乎沒有任何觀測儀器可以幫助我們直接地觀測到颱風內部潛熱釋放的情形，這限制了我們對颱風內部結構認知及對颱風強度變化預測的能力(Cecil and Zipser 1999; Nolan et al. 2019)。Wu et al.(2021)通過WRF(Weather Research and Forecasting)模式之模擬，在發現颱風系統中，中高對流層內之潛熱釋放與冰水含量間具有強烈之相關性，此結果表明可藉由觀測冰水之含量間接得知潛熱釋放之情形。

颱風的增強速率與颱風中心周遭對流的分佈與組織性相關，觀測分析亦指出颱風所處之環境垂直風切之方向與大小與對流之切向分佈高度相關。過去許多研究依據環境垂直風切向量的指向，將颱風依據風切的上下側及左右側分為四象限，用以探討不同增強速率颱風之相關背景環境參數與熱力及動力參數在空間中的分佈及其隨時間演變的情形。(Shi and Chen 2021; Richardson et al. 2022)

垂直風切會使得颱風對流呈現 wave number 1 特徵(Frank and Ritchie 1999; Corbosiero and Molinari 2002,2003; Wingo and Cecil 2010; Hence and Houze 2011; DeHart et al. 2014; Alvey III et al. 2020; Richardson et al. 2022)，亦即下風切處對流被增強，而上風切處的對流被抑制。有鑑於垂直風切對於颱風的結構以及強度有深遠的影響，因此相當值得探討：在具風切環境下的颱風，其他因素如何阻礙或是促進颱風快速增強(RI)的發生。

Alvey et al.(2020)透過模式系集預報分析 RI 颱風個案，其透過模擬的雷達回波將降水類型分成深對流、濃積雲、層狀降水、無降水以及砧狀雲等類型。他們發現當颱風中高層與低層的中心對齊後，發生 RI 的成員其上風切處大氣逐漸增濕，且其層狀降水與砧狀雲的比例亦逐漸上升，然而沒發生 RI 的成員則無此現象。

Liu et al.(2022)則透過 Himawari-8 衛星所反演的資料，針對不同強度及不同增強速率下的颱風其雲與降水參數進行分析。其發現發生 RI 的颱風中心周遭具有高比例的深對流並伴隨低亮溫，且同時具有高瞬時降雨率及較大的雲光學厚度。在颱風強度較弱(≤ 64 kts)的時候，RI 的颱風其雲頂高度、瞬時降雨率及光學厚度相較於 Non-RI 的颱風來得較大，特別是在颱風內核處(≤ 3 RMW)格外顯著。然而在颱風已發展到較強階段時(> 64 kts)，RI 與 Non-RI 颱風的差異性則不顯著。這顯示在颱風強度較弱時，藉由衛星觀測相關雲與降水的參數可以提供預測颱風未來增強速率的可能性。

前人研究發現使用不同雲微物理參數法進行颱風模擬，亦會改變颱風之結構、風場及軸對稱性等變數(Fovell et al., 2009, 2010)。模式模擬若採用只考慮暖

雲過程之微物理法時，有時會使得颱風增強速率增加或是達到更高的強度，有時颱風強度卻更弱，此現象亦說明雲微物理過程之不確定性及正確選擇雲微物理參數法之重要性(Bu 2012)。不同的雲微物理方案，降水粒子所具有的終端落速亦有很大的差異。Li et al.(2022)使用 WDM6 模擬對流系統時發現，針對軟電設定不同的終端落速會影響到對流系統的發展，其發現使用較大終端落速的模擬會產生較大的降雨率。終端落速的差異與雲內降水粒子之間的潛熱釋放量值更是具有很強烈的非線性關係。Fovell et al.(2009)則發現模擬颱風時，純暖雲的 Kessler scheme 相較於其他具有冷雲過程的雲微物理參數法能更快的產生雨水，這使得雲內的降水粒子具有更大的尺寸及落下速度。

1.2 研究動機

過去的前人研究主要針對不同強度或是針對快速增強(RI)與非快速增強[包含緩慢增強(SI)、無顯著變化(NT)及減弱(WK)]背景環境及颱風內核之熱力及動力參數進行比較，較少研究針對快速增強與緩慢增強的颱風進行分析比較。

對流的分佈演變及組織性對於颱風的增強速率有著深遠的影響，而對流的分佈則受與垂直風切之量值及方向顯著相關。雲微物理過程在對流內部潛熱釋放及降水過程扮演至關重要的角色，過去較少研究針對不同增強速率之颱風在雲微物理參數及降水類型差異上進行分析探討。

因此本研究除希冀透過衛星觀測反演之雲微物理相關參數進行比較，亦透過 WRF 模式獲得高時間及高空間解析度之模式輸出，進一步探討快速增強與緩慢增強颱風之間的差異，並輔以衛星觀測資料互相參照。

1.3 論文架構

本論文分為五章。第一章為緒論。第二章為研究方法，簡介本研究中所使用之衛星資料、颱風相關資訊、環境垂直風切計算方式、WRF 模式設定及降雨

類型分類方式。第三章為 SSMIS 衛星資料、紅外頻道亮溫資料及與 WRF 模式控制組比較分析，除分析衛星資料合成分析之結果，亦討論 WRF 模式針對不同增強速率颱風之模擬結果。第四章則為冷暖雲微物理參數法敏感度實驗，將分別就 RI 與 SI 的個案探討冷暖雲不同微物理參數法對其結果之影響。第五章則為結論。

第二章、研究方法



2.1 衛星資料處理與介紹

SSMIS(Special Sensor Microwave Imager Sounder)是一款搭載在美國 DMSP 繞極軌道衛星(Denfense Meteorological Satellite Program)的微波輻射儀。DMSP 一共有 F16、F17、F18 及 F19 四顆衛星，當中前三者目前仍在正常作業中，其掃描寬度約 1700km。其輻射儀共有 24 個頻道，接收頻率介於 19 至 183 GHz，藉由接受自然界發射出的微波，以反演大氣中的可降水量、水相粒子、冰相粒子、海冰等物理量。

人們藉由大氣中不同氣體在不同頻道具有不同發射率及透射率來反演推得許多微波遙測的參數。好比 91GHz 的頻道，主要受到冰晶散射的影響，不僅可以用來反演冰晶含量亦可用來評估降水。又好比 37GHz 對雲中含水量具有較高的敏感度，可以協助我們評估大氣中的降雨量及降雪量等。

本研究使用 GPM(Global Precipitation Measurement)團隊利用 SSMIS 資料所反演之冰水路徑 IWP(Ice Water Path)及雨水路徑 RWP(Rain Water Path) (GPM Science Team 2016)，其空間解析度約為 12km×12km，時間解析度則約每 3 小時一筆。

本研究除使用微波頻道所反演之 IWP 及 RWP 外，亦使用 NCEP、NOAA/CPC 及 GPM 團隊反演與維護的紅外波段的亮溫資訊進行分析，由於本研究之個案位於西北太平洋(本研究個案落在北緯 5 至 30 度，東經 110 至 170 度)，個案之時間位於 2012~2021 年之間，因此 2015 年 7 月前之個案紅外亮溫之資料源於 MTSAT(Multi-functional Transport Satellite)，而 2015 年 7 月後之資料則來自 Himawari-8 衛星，其空間解析度約為 4km×4km，時間解析度則約每 30 分鐘一筆。

本研究針對 5 個時間點進行合成分析，分別為颱風增強前 24 小時(RI/SI - 24h)，增強前 12 前小時(RI/SI-12h)、增強開始(RI/SI onset)、增強後 12 小時(RI/SI

+12h)及增強後 24 小時(RI/SI +24h)，在每個時間點分別選擇 10 個衛星有掃描到的個案進行合成。囿於繞極衛星數量及其掃描寬度的限制，颱風被掃描到的時間較不固定，所以並非每個颱風在上述五個時間點皆能獲得 IWP、RWP 及紅外亮溫的資訊。因此在合成衛星資料時，我們需要從多於 10 個颱風的個案中挑選 10 個颱風進行合成。RI 颱風的自 14 個颱風中挑選有被掃描到 10 個颱風，不巧的是本研究中 SI 颱風個案被掃描到的次數較少，因此需自較多的颱風個案(18 個)挑出 10 個颱風進行合成，挑選的個案如表 3-1(RI)及表 3-4(SI)所示。

本研究所選用颱風個案皆為處西北太平洋，篩選颱風個案時濾除在 RI 或 SI 前後 24 小時有登陸的個案，以避免颱風與陸地產生交互作用而對於研究分析造成影響。同時在 RI 或 SI 前後 24 小時所處緯度不超過北緯 30 度，以避免颱風與中緯度系統發生交互作用而影響分析結果。最後本研究亦僅挑選該颱風生命週期內第一次發生 RI 或是 SI 的個案，以避免其過去的強度變化過程對於後續強度變化造成影響，以確定影響同類型增強速率個案之分析一致性。

2.2 颱風路徑強度與最大風速半徑

本研究採用 IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship) 所提供的颱風資訊，當中西北太平洋之資訊採用美國海軍聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center; JTWC) 所提供的最佳分析資料。其資料為每 3 小時一筆，當中包含颱風定位、最大平均風速及最大暴風半徑等資訊。因為 DMSP 繞極軌道衛星掃描到颱風的時間並非一定落在最佳分析(best track)提供資料的時間，因此會針對颱風定位、最大平均風速及最大暴風半徑(Radius of Maximun Wind, RMW)等資訊進行時間上的線性內插，以接近衛星掃描當下時間點颱風之正確強度及定位資訊。

2.3 再分析資料與風切計算

為了計算颱風背景環境之垂直風切，本研究採用歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 第五代再分析資料(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)(Hersbach et al. 2020)，其時間解析度為 1 小時一筆，空間水平解析度為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。本研究透過 ERA5 資料分別計算以颱風中心位置為中心，且相距中心 200 公里半徑至 800 公里半徑同心圓之 200 百帕及 850 百帕平均風場，再將 200 百帕風場減去 850 百帕風場，以此計算不同時間點颱風所處環境之垂直風切的大小及方向。

由於每個颱風的大小及風切向量有所差異，本研究將所有變數投影至極座標平面下，分析 RI 及 SI 颱風其內核(3RMW 內)之空間及時間上的變化及差異；同時也將 IWP 及 RWP 等資料隨個案之不同時間點之垂直風切向量都統一旋轉成東風風切，即在風切向量之相對座標(shear-relative framework)下進行比較分析。

如圖 2-1 所示，圖中同心圓左半側(即風切向量指向)，即為下風切處，而在下風切處風切向量左側之象限稱為 Down Shear Left (DL)象限，下風切處風切向量右側之象限稱為 Down Shear Right (DR)象限，而圖中同心圓右半側為上風切處，而在上風切處風切向量左側之象限稱為 Up Shear Left (UL)象限，上風切處風切向量右側之象限稱為 Up Shear Right (UR)象限。

2.4 WRF 模式設定

本研究使用 WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model)，分別針對 RI 與 SI 個案各模擬一個颱風個案，當中選定 RI 個案為 2021 年蘇力基颱風，選定 SI 個案則為 2018 年珊珊颱風。由於兩者分別在 RI 與 SI 前後一天內，衛星掃描到其內核之次數相較其他颱風個案多，因此不僅可藉由衛星觀測分析其時間及空間上的演變，亦可作為 WRF 模式模擬結果之比較參考。同時我們亦針對 RI 個案 2021 年蘇力基颱風 RI 前之 SI 階段進行比較分析。



針對 2021 年蘇力基颱風之 WRF 模式設定如下：

- 1.使用 Advanced Research WRF version 3.9
- 2.模擬時間從 2021/4/12 00 UTC 至 2021/4/17 00 UTC，共 120 小時。
- 3.四層巢狀網格，水平解析度分別為 27、9、3、1 公里，網域範圍如圖 2-2 所示。
- 4.垂直座標為 eta 座標，共有 55 層，模式頂部為 20 百帕。
- 5.使用 Kain-Fritsch 積雲參數法(Kain, 2004)、WDM6 雙矩量雲微物理參數法(Hong et al. 2010)，短波及長波輻射參數化分別使用 Dudia 方案(Dudia, 1989)及 RRTM 方案(Mlawer et al., 1997)，邊界層參數化採用 YSU 方案(Hong and Pan, 1996)。其中積雲參數法只用於 27 公里網格。
- 6.初始條件與邊界條件使用歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 第五代再分析資料(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)(Hersbach et al. 2020) 0.25 度之分析資料，每 6 小時更新一次。

針對 2018 年珊珊颱風之 WRF 模式設定如下：

- 1.使用 Advanced Research WRF version 3.9
- 2.模擬時間從 2018/8/1 00 UTC 至 2018/8/6 00 UTC，共 120 小時。
- 3.四層巢狀網格，水平解析度分別為 27、9、3、1 公里，網域範圍如圖 2-3 所示。
- 4.垂直座標為 eta 座標，共有 55 層，模式頂部為 20 百帕。
- 5.使用 Kain-Fritsch 積雲參數法(Kain, 2004)、WSM6 單矩量雲微物理參數法(Hong and Lim, 2006)，短波及長波輻射參數化分別使用 Dudia 方案(Dudia, 1989)及 RRTM 方案(Mlawer et al., 1997)，邊界層參數化採用 YSU 方案(Hong and Pan, 1996)。其中積雲參數法只用於 27 公里網格。本研究亦有使用 WDM6 雙矩量雲微物理參數法進行 SI 颱風個案的模擬，然而結果發現在風切向量相對座標下，WDM6 所模擬的對流位置與衛星觀測位置差距過大，因此選擇與衛星觀測較為一致的 WSM6 模擬結果。

6.初始條件與邊界條件使用歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 第五代再分析資料(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)(Hersbach et al. 2020) 0.25 度之分析資料，每 6 小時更新一次。



2.5 降雨類型分類與軸對稱率計算

本研究依據 WRF 模式模擬的降水粒子混合比轉化之雷達回波，首先將 2 公里高度的雷達回波大於或等於 42 dBZ 之格點視為對流性降水格點，小於 42 dBZ 的格點則視為層狀降水格點(Churchill and Houze 1984; Steiner et al. 1995; Yuter and Houze 1997; Didlake and Houze 2013a)。再將對流性降水格點依據其 20 dBZ 雷達回波頂部之高度分成三類，當 20 dBZ 回波頂部之高度大於 10 公里時則視為深對流(Deep Convection, DC)類型，若 20 dBZ 回波頂部之高度介於 4 至 10 公里時則視為中等對流(Moderate Convection, MC)類型，而當 20 dBZ 回波頂部之高度小於 4 公里則視為淺對流(Shallow Convection, SC)類型。而層狀降水之格點則是檢視其上下垂直層內是否具有大於 20 dBZ 之格點進行再分類，若有則視為層狀降水(Stratiform, ST)類型，若無則視為弱回波(Weak Echo, WE)類型(Tao and Jiang 2015; Fritz et al. 2016; Rogers et al.2020; Wu et al. 2022)。

而實務上根據此方法進行降雨類型分類後，有可能會低估強對流所佔之面積；此方法雖可協助我們找出回波極值位置定位出強對流所在格點，然而往往實際之對流面積可能大於我們依據上述分類法所定出之對流面積。因此 Didlake and Houze (2009)依據格點之背景回波(Z_{bg})定義對流半徑，如式(3-1)所示；其可依據不同回波值計算出該格點之影響範圍(R)，此方法以降水強度越強之類型優先取代其他格點為原則(DC>MC>SC>ST>WE)進行再分類。舉例來說，一格點之背景回波為 50 dBZ 之 DC，以其格點為中心，其半徑 4 公里內原先未被定義為 DC 之格點將被重新定義為 DC。

$$R = \begin{cases} 0.5, Z_{bg} < 20 \\ 0.5 + 3.5\left(\frac{Z_{bg}-20}{15}\right), 20 \leq Z_{bg} \leq 35 \\ 4, Z_{bg} > 35 \end{cases}$$



(3-1)

本研究亦依據 Miyamoto and Takemi (2013)之定義，分別針對衛星觀測及 WRF 模擬結果進行 RI 及 SI 個案的 IWP 及 RWP 之軸對稱率變化及差異進行探討，如式(3-2)及式(3-3)所示。其中 ϕ 為任意變數， $\bar{\phi}^\lambda$ 為任意變數取軸對稱平均之值， ϕ' 則為任意變數之擾動量， γ 則為軸對稱率。IWP 及 RWP 在 WRF 模式結果中計算方式如式(3-4)及式(3-5)所示。其中 ρ_{air} 為空氣之密度， q_{ice} 為冰之混合比， q_{snow} 為雪之混合比， $q_{graupel}$ 為軟雹之混合比， q_{rain} 為雨之混合比。

$$\phi(r, \lambda, z, t) = \bar{\phi}^\lambda(r, z, t) + \phi'(r, \lambda, z, t) \quad (3-2)$$

$$\gamma(r, z, t) = \frac{\bar{\phi}^\lambda(r, z, t)^2}{\bar{\phi}^\lambda(r, z, t)^2 + \int_0^{2\pi} \phi'(r, \lambda, z, t)^2 d\lambda / 2\pi} \quad (3-3)$$

$$IWP = \int_{z=0}^{\infty} \rho_{air} (q_{ice} + q_{snow} + q_{graupel}) dz \quad (3-4)$$

$$RWP = \int_{z=0}^{\infty} \rho_{air} q_{rain} dz \quad (3-5)$$

Miyamoto and Takemi (2013)將 γ 之值以颱風中心為中心取 100 公里內之平均，而本研究則是取 2RMW 內之平均作為軸對稱率之參考，以利比較不同大小之颱風其軸對稱率變化及差異。

2.6 颱風個案背景介紹

本研究分別針對 RI 個案蘇力基颱風(2021)及 SI 個案珊珊颱風(2018)進行 WRF 模擬，其相關介紹如下。

蘇力基颱風(2021)，臺灣中央氣象局於 2021 年 4 月 12 日命名，其生成於菲律賓賓東方海面，其生命週期內最高近中心風速曾來到 55 m/s(中央氣象局)，而近中心最低氣壓最低曾來到 910 百帕(中央氣象局)，其打破四月份北半球最高風速紀錄，寫下四月份最強熱帶氣旋的紀錄。蘇力基颱風的移動主要受到副熱帶高壓的導引，在生命週期前期大致朝西北向菲律賓移動，其靠近菲律賓陸地時，副熱帶高壓勢力逐漸東退並轉為南北向，蘇力基颱風遂轉東北並逐漸減弱轉化為溫帶氣旋。根據 IBTrACS 的紀錄其曾經在一天之內增強 60kts(2021/04/16 1200Z ~ 2021/04/17 1200Z)，遠遠超過 RI 的標準(30kts/day)。蘇力基颱風(2021)生命後期受到強垂直風切及捲入乾燥東北季風的影響而逐漸減弱，並隨著其北上東移後逐漸轉化為溫帶氣旋。

珊珊颱風(2018)，臺灣中央氣象局於 2018 年 8 月 3 日命名，其生成於日本本州南南東方海域，其生命週期內最高近中心風速曾來到 40 m/s(中央氣象局)，而近中心最低氣壓最低曾來到 955 百帕。珊珊颱風之移動亦主要受其東方南北向之副熱帶高壓環流導引而偏北北西~北移動，其逐漸接近日本本州逐漸轉偏東遠離日本並轉化為溫帶氣旋。根據 IBTrACS 的紀錄，其曾經在一天之內增強 25 kts (2018/08/02 1200Z~2018/08/03 1200Z)，此增強幅度屬於緩慢增強(SI)。珊珊颱風(2018)持續北上後，因進入較高緯度海面，受到低海溫及強垂直風切的影響而逐漸減弱，並逐漸轉化為溫帶氣旋。

第三章、SSMIS 衛星資料與 WRF 模式控制組比較分析

3.1 衛星資料合成分析之比較

誠如上一章所述，針對 RI 及 SI 的颱風我們分別自 14 及 18 個颱風中挑選 10 個颱風個案進行合成分析。表 3-1 及表 3-4 顯示 RI(14 個)與 SI(18 個)颱風之名稱、年份、生命期內最大增強速率及生命期內最高風速值。表 3-2 及表 3-5 說明 RI 與 SI 颱風個案不同時間點合成的 10 個個案。表 3-3 及表 3-6 則顯示 RI 與 SI 颱風個案進行合成的個案於該時間點之 RMW 大小。

圖 3-1 為 RI 颱風個案 IWP 在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時合成後之結果。圖 3-2 為 SI 颱風個案 IWP 在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時合成後之結果。

由圖 3-1 可見，在 RI 前 24 小時颱風 2 倍 RMW 內 DL 象限之 IWP 較其他象限較大；隨著時間來到 RI 前 12 小時的時間點，合成分析顯示颱風在 DL 象限的 IWP 量值開始增加，意味著此處的對流有逐漸開始增強的趨勢。然而在 RI 即將開始的前後，RI 個案 2 倍 RMW 距離內的 IWP 似乎有減弱的情形，尤其是原先在 DL 象限較大的 IWP 量值顯著減弱，這點與 Munsell et al. (2021) 使用 GOES-16 衛星紅外線頻道亮溫分析快速增強颶風之個案時有類似情形。他們發現在颱風發生 RI 前後，颱風內核的雲頂亮溫有短暫上升的情形。此現象之發生原因及物理機制尚不明朗，有待後續研究之進一步討論。而在 RI 開始後 12 小時以及後 24 小時，上風切處之 IWP 亦開始增強(尤其是在 UL 象限)，此代表颱風之強對流開始往上風切處傳播；且在 DL 及 UL 象限之 IWP 皆有逐漸增強之趨勢，意味著 RI 颱風的 IWP 及對流在 RI 開始後軸對稱率開始增加。

然而當我們檢視 SI 之個案之 IWP 分布(圖 3-2)，我們發現在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時，較大之 IWP 主要分布在下風切處。同時我們發現 SI 個案在開始增強後，其不若 RI 之個案在開始增強後高 IWP 量值有往 UL 象限傳播的趨勢。

圖 3-3 為 RI 個案 RWP 在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時合成後之結果。圖 3-4 為 SI 個案 RWP 在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時合成後之結果。

我們比較 IWP 與 RWP 在五個時間點的合成分析結果，不論是 RI 或 SI 颱風的合成分析，RWP 時空的演變特性與 IWP 之變化趨勢相當一致。RI 颱風個案在增強之前 RWP 較大量值主要分佈在 DL 象限，RI 開始時 RWP 有略為減弱的情形，開始增強後 UL 象限之 RWP 亦開始增強，使其 RWP 軸對稱性逐漸增加。SI 颱風的合成分析則顯示，在增強前後 24 小時內 SI 個案較強之 RWP 主要分佈在下風切處，且在 SI 開始後，其 RWP 量值無明顯上升的情形。

為了檢視 RI 與 SI 颱風個案在空間上及時間上的差異及其變化是否具有代表性，我們將 RI 及 SI 個案的 IWP 及 RWP 合成結果分別進行 Student's T 檢定，圖 3-5 及 3-6 分別顯示 RI 相對於 SI 個案在五個時間點(增強前 24 小時、前 12 小時、增強開始、增強後 12 小時及增強後 24 小時)IWP 及 RWP 的差值及是否具有統計顯著代表性，圖中標記圓點處表示其在 95%信心水準下，該位置具有統計顯著性。

自圖 3-5 及 3-6 我們發現在颱風增強開始前 24 小時的時候，RI 個案和 SI 個案在 3RMW 內大部分區域尚未具有統計上顯著差異，僅在 UR 象限 RI 個案有部分區域顯著大於 SI 個案，同時在 DR 象限 1~2RMW 之間 RI 平均值小於 SI 個案(但不具統計顯著性)。在颱風增強開始前 12 小時，2RMW 內大部分區域 RI 個案之 IWP 及 RWP 皆大於 SI 個案，且具有統計上之代表性，這意味此時 RI 個案之對流及降水強度已經顯著大於 SI 個案數值。然而在增強開始的時間點時，RI 與 SI 之 IWP 及 RWP 量值差異縮小，且具有統計差異顯著性的區域大幅縮小；而此現象與圖 3-1(c)及圖 3-3(c)中 RI 的颱風在 RI 開始前後的時間點 IWP/RWP 發生減弱的情形有關，將導致其 IWP 與 RWP 和 SI 個案的差異縮小進而導致統計代表性不足，有關此現象會在本章下一小節說明。

Nolan et al. (2019)使用 WRF 模式模擬發現，颱風垂直方向的上潛熱加熱量

值的積分與垂直方向上冰相及液相粒子含量的積分呈現高度相關。颱風的增強過程更是和潛熱加热的量值及高度息息相關，透過 DMSP 衛星觀測所反演的 IWP 以及 RWP 我們得以間接獲得颱風內部潛熱釋放的情形。圖 3-5(b)及圖 3-6(b)中，我們發現 RI 與 SI 颱風個案在增強發生前 12 小時，其 2RMW 距離內的 IWP 及 RWP 已具有統計上顯著的差異，透過此現象我們可以間接得知 RI 與 SI 的個案在開始增強的前 12 小時，RI 颱風的個案在 2RMW 距離內的潛熱加热量值已經顯著多於 SI 颱風的個案。透過更多的潛熱加熱得以產生更多的熱能並轉化為動能，進一步發生更高的颱風增強速率。

在颱風開始增強後 12 小時，颱風 2RMW 內之 IWP 及 RWP 差值逐漸擴大，且在 DR、UL、UR 象限皆具有統計之代表性。在 SI 合成分析中，DL 象限具有相對其他象限較大之 IWP 與 RWP，因此在此時間點 DL 象限之 IWP 及 RWP 之差異較小，且多數區域未通過統計檢定。而在颱風開始增強後 24 小時之後，颱風 3RMW 內之 IWP 及 RWP 差值進一步擴大，RI 的個案不論 IWP 或是 RWP 皆明顯多於 SI 的個案，且皆具有統計之代表性。

在圖 3-5(d)、(e)及圖 3-6(d)、(e)中，我們發現 RI 及 SI 的 IWP 及 RWP 之差距具有統計上之代表性且差距隨著時間擴大，此現象則進一步說明了在此時刻 RI 的颱風個案及 SI 的颱風個案兩者在颱風內核的加熱差異逐漸增大，不同的加熱率使得 RI 組的颱風具有更高的增強速率，更高的增強速率更進一步使得 RI 的颱風個案其強度逐漸大於 SI 颱風個案。

接著我們透過紅外波段的亮溫合成分析，進一步探討 RI 與 SI 的個案之間亮溫在不同時間點的變化情形及差異。在圖 3-7(a)、(b)及圖 3-8(a)、(b)中我們發現不論 RI 或是 SI 的颱風個案合成分析均顯示 3RMW 內具有較低亮溫的區域皆位置 DR 及 DL，然而隨著時間推移，在 RI 開始後由圖 3-7(c)~(e)可見 RI 颱風個案合成分析顯示不僅其下風切處之亮溫逐步下降，其上風切處之亮溫亦逐漸降低，意味著颱風上風切處之對流正在逐步增強，然而在 SI 颱風個案的合成分析結果則與 RI 颱風個案合成分析截然不同。圖 3-8(c)~(e)顯示在 SI 開始後其下風切處

兩象限之亮溫雖有逐漸下降的趨勢，其上風切處之亮溫則無明顯下降的情形，意味著 SI 的颱風個案在增強開始後，其較強的對流仍位於颱風下風切處的位置，並無往上風切處發展的情形。

在圖 3-9 中，本研究進一步針對 RI 與 SI 個案在不同時間點進行比較，並進行統計分析。紅外波段的亮溫資料與由微波反演的 IWP 及 RWP 顯示的結果略有差異，在 IWP 與 RWP 的比較中我們發現在增強開始前 12 小時的時候兩者在 2RMW 內已具有顯著之差異，然而紅外波段的亮溫在增強前 12 小時的時候，雖在 3RMW 內多數區域(除 DR 象限之外)RI 颱風個案的亮溫已經低於 SI 之個案，但不具有統計之顯著意義。同時我們也注意到在增強開始當下的合成分析結果的差異其顯示 RI 的颱風 IWP 及 RWP 在颱風內核有減弱的趨勢，使得 RI 與 SI 颱風個案兩者之統計差異性降低，僅侷限於 1RMW 內，然而亮溫的合成分析卻顯示此時兩者亮溫差異逐漸擴大，且在 2RMW 內具有統計顯著性。在增強開始後 12 小時，兩者在 2RMW 內之差異逐漸擴大，尤其是在上風切處的象限，然而 SI 颱風個案在 DL 象限仍具有較低之亮溫，使得 RI 與 SI 的差異在此象限較不顯著，一直到增強後 24 小時兩者在 DL 象限的差異才具有顯著性。

在本研究中，我們發現透過來自衛星微波所反演的 IWP 及 RWP 相較於紅外亮溫的資訊可較早得出 RI 與 SI 颱風個案的差異性。由於紅外波段的亮溫資訊較侷限於颱風的頂部，藉由 IWP 及 RWP 的資訊可協助我們窺得颱風中層及低層的資訊，進而產生此類的差異。

3.2 SSMIS 衛星資料與 WRF 模擬之比較

針對 RI 與 SI 的颱風，我們分別挑選一個 SSMIS 在其增強前後 24 小時內掃描到最多次的颱風、颱風初始大小與強度較為接近的個案，以利我們在增強前後 12、24 小時及剛開始的時段皆可進行比較。RI 的個案我們挑選 2021 年蘇力基 (SURIGAE) 颱風，SI 則是挑選 2018 年珊珊 (SHANSAHN) 颱風。圖 3-10 (a)-(e) 為

蘇力基颱風其 IWP 在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時 SSMIS 觀測的結果，而圖 3-11 (a)-(e)為蘇力基颱風其 IWP 在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時 WRF 模擬的結果。

比較圖 3-10 與圖 3-11 我們發現在這五個時間點 WRF 所模擬出來的 IWP 明顯比 SSMIS 觀測的量值還要大上許多，我們推測這可能是由於 SSMIS 的空間解析度僅約 12 公里，而 WRF 模擬為 1 公里水平解析度，導致 SSMIS 觀測之解析度不足以解析部分強對流，或是 WRF 模式其微物理參數化法本身之特性所致。

若從 IWP 的空間分佈進行比較，我們會發現觀測與模式的結果類似。在 RI 前 24 小時及前 12 小時，IWP 較大的區域主要位在下風切處(DR 及 DL 象限);而在 RI 開始的時間點，不論是模式抑或是觀測皆有觀察到 IWP 有減弱的情形;但隨著颱風增強的開始，DL 象限的 IWP 重新增強，同時 UL 象限之 IWP 亦逐漸增大;甚至到了增強後 24 小時，UR 象限之 IWP 亦有微幅增加的趨勢。

圖 3-12 (a)-(e)為蘇力基颱風其 RWP 在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時 SSMIS 觀測的結果，而圖 3-13 (a)-(e)為蘇力基颱風其 RWP 在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時 WRF 模擬的結果。在圖 3-12 中 RWP 觀測的結果與圖 3-13 中模擬的結果，亦呈現與 IWP 類似的變化趨勢。颱風 RI 開始後，DL 象限的 RWP 重新增強，同時 UL 象限之 RWP 亦逐漸增大，使得 RWP 之軸對稱性逐漸增加。

在本研究分析的五個時間點中，WRF 模擬的 RWP 亦明顯多於 SSMIS 觀測值，但在 RI 後 12 與 24 小時在 UL 及 DL 象限中 IWP 之高估情形較 RWP 嚴重，WRF 模擬中具有高 IWP(深紅色)之面積明顯 SSMIS 多於觀測值，而 WRF 模擬中具有高 RWP 之面積則較接近 SSMIS 觀測值。

值得一提的是，不管是 SSMIS 衛星觀測或 WRF 模式模擬，我們皆發現在 RI 開始的前後數小時內，2 倍 RMW 距離內的 IWP 及 RWP 似乎有減弱的情形，尤其是原先在 DL 象限較大的 IWP 量值顯著減弱，這點與 Munsell et al. (2021)

使用 GOES-16 衛星紅外線頻道亮溫分析快速增強颶風之個案時有類似情形。Munsell et al. (2021)他們發現在颶風發生 RI 前數小時，颶風內核的雲頂亮溫顯著上升，並持續數十分鐘不等。此現象之發生原因及物理機制尚不明朗，有待後續研究進一步討論。

圖 3-15(a)-(e)及圖 3-16(a)-(e)分別為 SSMIS 觀測及 WRF 模擬珊珊颱風 IWP 在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時的結果。我們發現在 SI 前 24 小時的時候，不論觀測或是模式模擬的結果，在珊珊颱風 2RMW 距離內的 IWP 量值仍較低，直到 SI 前 12 小時 DL 象限之 IWP 才明顯增強。在 SI 前 12 小時、SI 開始當下及 SI 後 12 小時等時間點的模式模擬及觀測中，下風切處的 DR 或 DL 象限具有較大的 IWP，一直到 SI 後 24 小時上風切處的 IWP 才有略為增加的情形。至於在 2RMW 距離內 WRF 模式所模擬出的 IWP 傾向多於衛星觀測的情形，則是和 RI 的個案結果類似。

圖 3-17(a)-(e)及圖 3-18(a)-(e)分別為 SSMIS 觀測及 WRF 模擬珊珊颱風 RWP 在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時的結果。圖 3-17 與圖 3-18 顯示不論觀測或是模式模擬 RWP 的分佈及變化趨勢與 IWP 雷同，在我們分析的五個時間點，2RMW 內具有高 RWP 值的區域主要位在下風切處。然而我們發現 SI 後 24 小時的時候，強 RWP 的分布較集中於 DL 象限，不似 IWP 除了 DL 象限外，在 DR 象限亦有出現較大量值之 IWP，此現象指出高 IWP 覆蓋了更多面積，因而相較 RWP 具有較高的軸對稱性。

過去許多研究指出，當颱風降雨及對流的軸對稱性增加時，會對應到颱風更高的增強速率(e.g., Alvey et al. 2020; Richardson et al. 2022)，亦有許多使用衛星觀測的研究發現，RI 發生後颱風的對流及降水除了在 DL 象限外，UL 甚至 UR 象限會開始發展出較大面積的強對流及強降水等特徵(e.g., Munsell et al. 2021; Richardson et al. 2022)，此與本研究透過分析颱風 3RMW 內 IWP 與 RWP 在不同象限之演變之發現相當類似。具有較高增強速率的蘇力基(2021)颱風，其在快速增強發生後上風切處的對流開始增強發展，使得其對流強度、IWP 及 RWP 的軸

對稱性皆高於發生 SI 的珊珊颱風。

本研究除了定性探討 RI 及 SI 個案軸對稱性的演變外，希望更能定量探討軸對稱性之變化。有鑑於此，本研究依據 Miyamoto and Takemi (2013) 針對軸對稱率定義，分別就 RI 及 SI 颱風個案，就 WRF 模擬與 SSMIS 觀測之 IWP 及 RWP 在 3RMW 範圍內之軸對稱率變化進行探討。

在圖 3-20 中，我們發現在 SSMIS 之觀測中 RI 個案蘇力基(2021)颱風，不論是 IWP 或 RWP 其軸對稱率量值在增強前 24、12 小時及增強開始當下及增強開始後 12 小時，皆較 SI 個案珊珊颱風(2018)大 0.1 至 0.2。而不論是 RI 或是 SI 颱風的個案，其 IWP 及 RWP 之軸對稱率皆在颱風開始增強後有所提升。

為了更仔細探討軸對稱率隨時間之演變，本研究亦針對 WRF 模擬的 IWP 及 RWP 軸對稱性之演變趨勢進行比較分析。我們發現圖 3-21 中 WRF 模擬之 RI 個案蘇力基颱風其 IWP 及 RWP 之軸對稱率，自 RI 前 24 小時由 0.6 逐漸下滑至 RI 開始當下的 0.4 與 0.2 上下，其可能肇因於 DL 象限對流的不斷肇始及 RI 發生前數小時對流發生短暫減弱，使得 IWP 及 RWP 的分佈愈發不對稱。但隨著 RI 開始後，颱風在 UL 象限甚至 UR 象限對流開始增強，使得 RI 個案蘇力基颱風中 IWP 及 RWP 之軸對稱性又開始緩步回升至 RI 後 24 小時的 0.7 與 0.5 左右。

相較於 RI 個案，SI 個案珊珊颱風 IWP 及 RWP 軸對稱率之變化趨勢則相較單純，由於 SI 珊珊個案之強對流主要都集中在 DL 象限，不若 RI 個案蘇力基颱風會在增強開始後，UL 象限之對流明顯增強，且其對流亦不會在即將 SI 前有減弱的現象。因此除了在 SI 前 24 小時至 12 小時其軸對稱率有略微上升後，其 IWP 及 RWP 的軸對稱率分別維持在 0.4 及 0.3 上下。

綜合觀測分析與模式模擬的結果，我們發現 RI 蘇力基個案的 IWP 及 RWP 軸對稱率在我們分析的多數時段內(增強前後 24 小時)皆大於 SI 的珊珊個案結果，且不論 RI 或 SI 在大部分的時段內，其 IWP 的軸對稱率皆大於 RWP 的軸對稱率。不論是自 IWP 或是 RWP 軸對稱率隨時間點的演變，其皆可協助我們得知颱風內核對流及垂直方向上潛熱加熱對稱性隨時間演變的情形。一般而言，颱風在

切方向對流的分佈面積逐漸增加(一般而言，指上風切處的對流開始發展)，亦會帶動 IWP 及 RWP 的分佈面積隨之增加，此現象更會伴隨著更加對稱的潛熱加熱，使得颱風能更有效率的將可用位能轉化為旋轉動能，而這或許也是 RI 的颱風個案會具有較高增強速率及強度的主要原因之一。我們進一步比較觀測與模擬軸對稱性之差異，發現 WRF 模擬所得出之軸對稱率較低，此可能肇因於 WRF 模擬中 DL 強對流中 IWP 及 RWP 量值多於 SSMIS 觀測的量值，由式(3-2)可知，若取軸對稱平均後的擾動量越大，會使軸對稱性越低。

本研究中 WRF 模擬採用四層巢狀網格，最內層之網格其水平解析度為 1km x 1km，而 SSMIS 所觀測的 IWP 及 RWP 其水平解析度為 12km x 12km，不同解析度所能夠解析的對流及降水現象有所差異，也因此可能造成兩者所計算的軸對稱率有所差異。將 d04 內插成與觀測同解析度(12 km x 12 km)後，或是使用解析度較接近的 d02 得到的軸對稱率隨時間演變，結果依然相似。

3.3 WRF 模擬控制組 RI 與 SI(未伴隨 RI 之個案)之結果比較

過去許多觀測分析或是模式模擬的研究主要是針對 RI 與非 RI 的颱風進行比較，然而非 RI 的分類下，其包含了緩慢增強(SI)與強度持平甚至是減弱的颱風，此類研究中探討強度開始發生變化的當下，颱風的強度常有相當程度的差異，不利我們做進一步的探討。

過去僅有少數的研究比較 RI 與 SI 的颱風之間的差異性，兩者間增強前與增強後對流、降水分佈具有何種空間上或是時間變化上的差異，過去相關分析甚少。在前述章節中我們比較了 RI 以及 SI 的颱風在 WRF 模式與 SSMIS 衛星資料的差異，然而許多對流與降水特性的變化需要更高時間與空間解析度的資料進行探討與比較，因此在本章節我們將進一步比較討論 WRF 模式所模擬 RI 與 SI 颱風個案，在颱風內核處其冰相與液相粒子分佈、降水類型及其相關軸對稱性。

圖 3-22 與圖 3-23 分別比較了 2021 年蘇力基颱風 WRF 模式模擬結果與 Best

track 分析在 RI 前後一天 10 米風之時序圖，及 WRF 模擬時間內 WRF 模式與 Best track 颱風路徑差異。在 WRF 模擬中，RI 發生的前後一天內颱風之強度較 Best track 強 10~20kts，颱風發生 RI 的時間也略早於 Best track 的紀錄時間。

圖 3-24 與圖 3-25 則分別比較了 2018 年珊珊颱風 WRF 模式模擬結果 Best track 在 SI 前後一天 10 米風之時序圖，及個案 WRF 模擬時間內 WRF 模式與 Best track 颱風路徑差異。在 WRF 模擬中，SI 發生的前 24 到後 12 小時內颱風之強度較 Best track 略強 1~5kts，而 SI 後 12~24 小時 WRF 所模擬之強度則較 Best track 略低 5~10kt，颱風發生 SI 的時間則略早於 Best track 的紀錄時間。

透過比較圖 3-11 與圖 3-16 以及比較圖 3-13 與圖 3-18，我們分別比較了蘇力基颱風(2021)與珊珊颱風(2018)其內核不同象限之 IWP 和 RWP 在增強前 24 小時、增強前 12 小時、增強開始、增強後 12 小時以及增強後 24 小時 WRF 模擬的結果。可見不論 RI 或是 SI 的颱風個案在增強開始前，較大的 IWP 及 RWP 主要皆分布在 DL 及 DR 象限。然而增強開始後，RI 與 SI 個案兩者的 IWP 與 RWP 分布明顯不同，發生快速增強(RI)的颱風其 UL 象限之 IWP 及 RWP 逐漸增加，而 SI 颱風其 UL 象限之 IWP 及 RWP 則無顯著增加的現象。

圖 3-26 (a)~(b) 則進一步說明此現象，藉由 IWP 在不同象限之哈默圖我們發現，RI 與 SI 颱風在增強開始前，高 IWP 量值主要分布在 DL 或 DR 象限，然而 RI 蘇力基颱風(2021)在 RI 開始前後 3 小時經歷了一段 IWP 減弱時期後，其 DL 與 UL 象限的 IWP 開始增加，甚至在 RI 後 12 小時 UR 象限之 IWP 也有略為增加的趨勢。然而 SI 的颱風珊珊直到 SI 後 12 小時其 UL 象限之 IWP 才開始增加，然其量值與高 IWP 分佈的範圍仍遜於 RI 的颱風。圖 3-27(a)~(b)則透過分析 RI 與 SI 個案 RWP 在不同象限之哈默圖，在增強發生前，RI 與 SI 颱風個案高值之 RWP 主要集中於 DR 與 DL 象限，RI 蘇力基颱風在 RI 開始前後 3 小時 RWP 顯著減弱過後，其 DL 及 UL 象限之 RWP 開始增加，然而 SI 之颱風珊珊其在增強開始後，其高量值之 RWP 仍集中在 DL 象限，並無往其他象限擴展的趨勢。同時，我們發現不論 RI 或 SI 的個案，高值 RWP 所覆蓋的象限皆少於高值 IWP，

亦即不論 RI 或是 SI 的颱風其高值 IWP 相較 RWP 在颱風 3RMW 內覆蓋了較大的面積。

而上述結果與 Richardson et al.(2022)針對西北太平洋與北大西洋洋面之 RI 與 SI 颱風利用衛星紅外亮溫資料進行合成分析所得結果類似，其亦發現 RI 與 SI 颱風增強前強對流區主要位於 DL 及 DR 象限，且在增強開始前 RI 颱風個案之亮溫低於 SI 颱風個案且具有統計顯著性，其研究結果亦顯示儘管強對流空間分布情形在增強開始前類似，但 RI 颱風個案在增強前對流較強，而在增強開始後，RI 個案之 UL 及 UR 象限之亮溫開始下降，顯示其上風切處對流開始增強，而 SI 颱風個案之強對流低亮溫區仍主要集中在下風切處。

過去的研究亦指出，位於颱風風切左側常有下衝流帶來的低熵空氣，使得對流不易發展，而此時若風切左側的近地表潛熱通量提升有助於協助颱風克服此不利的環境並進一步令對流肇始(Wadler et al. 2018b, 2021)。圖 3-14 及圖 3-19 分別顯示蘇力基颱風(2021)與珊珊颱風(2018)在 RI 及 SI 前後 24 小時的海表潛熱通量 LHF(Latent Heat Flux)空間演變。由圖 3-14(a)及圖 3-19(a)可見在增強開始前 24 小時，RI 的颱風個案明顯已具有較高的 LHF，圖 3-14(b)及圖 3-19(b)則顯示在增強開始前 12 小時兩者的量值差異逐漸擴大，且 RI 的颱風個案在 UL 象限的 LHF 亦進一步增強。由圖 3-14(d)及圖 3-19(d)我們進一步發現，RI 的颱風個案在 RI 開始後 UR 象限的 LHF 亦開始顯著增強，使得颱風內核處 LHF 的軸對稱率進一步提升。此點發現與 Richardson et al.(2022)使用再分析資料進行合成分析的結果相似。RI 的個案相較於 SI 的個案在增強開始前 UL 象限的 LHF 已開始增強，隨著 RI 的開始 UR 的象限之 LHF 亦有顯著提升。較高量值與對稱性的 LHF 或許是 RI 的颱風個案在 RI 開始後 IWP、RWP 在 UL 象限逐漸增加的主因之一。

為了進一步了解 RI 與 SI 颱風的冰相及液相粒子在垂直方向上之演變差異，本研究分別針對不同高度層之冰水含量(Ice Water Content; IWC)及雨水含量(Rain Water Content; RWC)於增強前 24 小時、增強前 12 小時、增強開始、增強後 12 小時以及增強後 24 小時，取其軸對稱平均後，分析颱風內核(3RMW)內不同高度

之 IWC 及 RWC 差異。

在圖 3-28 (a)~(e)與圖 3-29 (a)~(e)中，分別比較了蘇力基颱風與珊珊颱風在增強前 24 小時、增強前 12 小時、增強開始、增強後 12 小時以及增強後 24 小時其 IWC 取軸對稱平均後在高度及 3RMW 內分布的情形。由圖 3-28 可見，在 RI 前後 24 小時內 IWC 主要分布在溶解層之上(約 7 至 18 公里高空中)；在 RI 前 24 小時及 12 小時較大的 IWC 量值主要分布在 7-10 公里處。隨著時間逐漸接近 RI 開始，IWC 逐漸減小，尤其在颱風中心至 RMW 此處已幾乎無 IWC 存在，除了呼應之前本文所述，RI 蘇力基個案在接近 RI 開始前後對流可能有發生減弱的情形外，亦代表颱風眼牆正在逐漸生成。而 RI 開始後，可見具有高 IWC 區域逐漸向上拓展至 12 公里處，且其量值亦逐步增加；至 RI 後 24 小時已可見大範圍 $>800\text{mg/g}$ 之 IWC 位置 1~2RMW 的 7~12 公里高空中。而 SI 珊珊個案之 IWC 在 SI 前後一天這段時間內 IWC 主要分佈在颱風內核 7 至 15 公里處，除了 IWC 延伸之高度較 RI 個案低之外，其 IWC 極值約 3~400mg/g 亦低於 RI 個案的極值。

在圖 3-30 (a)~(e)與圖 3-31 (a)~(e)中，分別比較了蘇力基(2021)颱風與珊珊颱風(2018)在增強前 24 小時、增強前 12 小時、增強開始、增強後 12 小時以及增強後 24 小時其 RWC 取軸對稱平均後在高度及 3RMW 內分佈的情形。不論 RI 或 SI 個案，RWC 主要分佈在溶解層之下(約 0~7 公里高空)。由圖 3-30 可見在 RI 開始前，颱風內核中低層存在大量之 RWC；而在接近 RI 發生當下，RWC 亦有大幅減少的情形。RI 開始後 RWC 開始增加，RMW 內之 IWC 隨著颱風開始快速增強，眼牆逐漸生成後而逐漸減小；同時 1~2RMW 內之對流開始增強，RWC 亦隨之大量增加，產生大範圍 RWC 超過 800mg/g 的區域。然而在 SI 個案中，自 SI 前 24 小時至 SI 後 24 小時 RWC 並無顯著增強的趨勢，其 RWC 量值大約維持在 200~400mg/g，在增強開始前僅約 RI 個案量值的 50%，而在增強開始後僅剩約 RI 極值的 30%。透過 IWC 及 RWC 的分析，我們可以更進一步分析颱風內核內部冰相及液相粒子在不同高度隨高度演變的情形，以及 RI 與 SI 的颱風其冰相及液相粒子在不同高度的差異。

過去的研究透過 WRF 模式模擬及觀測分析發現，颱風內核 6-10 公里高空的潛熱加熱量值和颱風未來強度變化相關，在圖 3-28(a)及圖 3-29(a)中，我們發現在颱風增強前開始 24 小時前有類似於前人研究的訊號(Wu et al. 2021)，即颱風 RMW 內 6-10 公里的高空 RI 颱風 IWC 有多於 SI 颱風 IWC 的情形，在此高度的潛熱釋放可較有效率地轉化成颱風的動能，使颱風具有更高的增強速率，然而在颱風增強前的 12 小時與增強開始的瞬間此訊號則不明顯，此訊號在個別的颱風個案之間是否通用，仍有待後續研究進一步釐清。

綜合前人透過模式模擬及衛星觀測資料分析的研究，颱風的增強速率與颱風內核的潛熱釋放位置與量值息息相關，藉由將颱風系統內對流釋放的潛熱不斷轉換為動能及可用位能。我們發現在 WRF 模式模擬中，RI 個案不論在增強前或後，相較 SI 個案均有較多的 IWC 與 RWC，其對應到的則是更多的潛熱釋放，如圖 3-32 及圖 3-33 所示。相較於 SI 的颱風，RI 的颱風具有軸對稱性更高的 IWP、RWP 及降水分佈，使得其內核有更多且更高效率的潛熱加熱釋放，進而始得颱風有更大的增強速率。

在過去許多研究當中，使用了雷達回波資料進行降雨類型的定義與分類，進而探討颱風、對流系統或是其他天氣系統當中的降雨類型差異及演變過程。承如本文第二章中第五小節所提及，本研究依據 Wu et al. (2022)使用之降雨類型分類方法進行分類，將降水型態分成五類，當中包含深對流(Deep Convection, DC)、中等對流(Moderate Convection, MC)、淺對流(Shallow Convection, SC)、層狀降水(Stratiform, ST)及弱回波(Weak Echo, WE)型態，同時定義對流半徑以減少對流面積受到低估的可能性。

圖 3-34(a)~(e)分別顯示了蘇力基(2021)颱風在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始當下、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時其降水類型在 3RMW 範圍內分布的情形。由圖可見在 RI 前 24 小時的時候，降雨主要分佈在 DR 及 DL 象限處，降雨以大量的 ST 及部份 DC 及 MC 類型為主。到了 RI 前 12 小時，降水開始往 DL 及 UL 象限移動，其中 DL 象限有降水的格點以 DC 為主，而在 UL 象限的降

水格點則是以 MC 及 ST 為主。到了 RI 開始當下，我們發現對流性降水面積大幅減少，降水此時以 ST 和少數 DC 及 MC 為主，此變化趨勢與 IWP 及 RWP 在 RI 前後有大幅減弱的情形雷同。而在 RI 開始後，由圖 3-34(d)、(e)可見 UL 象限的降水面積開始增加，不論 DC 或是 ST 的降水所占面積皆有增加。而上風切處 (UL 及 UR)ST 所占面積開始增加的現象與 Alvey et al. (2020)使用系集模式針對快速增強颶風之模擬結果類似，他們發現在颶風高低層的中心不再傾斜分離後，颶風上風切處之相對濕度開始增加，同時層狀降水之面積開始增加，並有利於進一步發生颶風的快速增強。

而緩慢增強的個案珊珊颱風的降水類型演變則相當不同，圖 3-35 (a)~(e)分別顯示了珊珊颱風在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始當下、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時其降水類型 3RMW 內分布的情形。在 SI 前 24 小時的時候，颱風 2RMW 內僅有零星的降水；一直到了 SI 前 12 小時，DR、DL 及 UR 象限的 ST 所占面積開始增強，但仍無明顯對流性降水的發生。SI 開始後，DL 處之 DC 面積才開始逐漸增加，同時其上風切處僅層狀降水面積亦開始增加，但與 RI 個案不同的是其上風切處對流性降水面積並無明顯的增加。

Alvey et al. (2020)發現增強速率非屬 RI 類型的颶風，其高低層的中心無法對準重合(alignment)，因而不利於進一步發生快速增強；同時此類颶風上風切處的層狀降水及砧狀雲比例在強度發生變化後無明顯增加。然而在本研究所進行的模擬當中，我們發現 SI 類型的颱風其上風切處之層狀降水亦有一定比例之增加，其結果與 Alvey et al. (2020)有所差異。其原因可能是該研究中強度變化的分類是將颶風分為 RI 與 Non-RI 後再進行比較，而本研究主要鎖定於比較 RI 與 SI 的個案，雖 SI 亦屬於 Non-RI 之分類，然而 Non-RI 當中也包含了 NT 及 WK 之個案，因而造成比較降水類型分佈時，其結果與本研究結果具有一定程度之差異。

為了進一步比較 RI 與 SI 颱風個案間在不同象限及不同時間之降雨類型差異，本研究除了計算不同類之降水類型在總降水個點中所佔比例，也計算了不同類之降水類型在 3RMW 內中佔所有格點之比例，並繪製時序圖進行比較。前者

之計算協助我們釐清不同象限中，不同降水類型佔整體降水比例及其變化；後者之計算則協助我們比較颱風在不同象限中，不同降水類型在 3RMW 內所占面積之變化情形。此外，不同象限圖之間的上下界(縱軸之百分比)可能有所差異，若設定相同之比例，可能造成部分降水格點數較少的象限其不同降水類型比例隨時間之變化無法被清楚地解析。

圖 3-36 顯示蘇力基颱風及珊珊颱風增強前後 24 小時內 DC、MC 及 SC 在四個象限當中分別佔總降水格點之比例變化時序圖。由圖可見，RI 蘇力基個案其 DL 象限在增強開始前 DC 及 MC 的比例皆高於 SI 珊珊個案，一直到增強開始後 SI 個案 DC 所佔之比例才開始逐漸增加至 20~30%，雖然受對流生命期及日夜變化影響，對流所占之比例有所消長，然而 RI 個案其 DL 象限之 DC 比例在 RI 前後一天內仍可大致維持在 20~40%。至於在 UL 象限，RI 的個案在 RI 開始後其上風切處之對流開始發展，DC 所占比例亦開始提升，然而 SI 的個案在 SI 開始後其 UL 象限之 DC 比例未有明顯之變化或提升。

圖 3-37 則顯示蘇力基颱風及珊珊颱風增強前後 24 小時內 ST、WE 在四個象限當中分別佔總降水格點之比例變化，由圖可見在 DL 象限不論 RI 或是 SI 的個案，其 ST 所占比例隨著時間逐漸下降，此趨勢意味著在 DL 象限中，RI 及 SI 的個案其對流性降水所占的比例隨著時間逐漸上升。而在 UL 象限，增強開始後 RI 的個案 DC 比例顯著增加，使得 ST 的比例逐漸下降，然而 SI 個案其在 UL 象限仍是以 ST 類型的降水為主。

圖 3-38 顯示蘇力基颱風及珊珊颱風增強前後 24 小時內，DC、MC 及 SC 在四個象限當中分別佔 3RMW 內總格點數之比例變化時序圖。由圖可見，多數時間內 UR 象限對流性降水所佔整體面積比例相當小。而在 DL 象限中，RI 個案蘇力基颱風在 RI 的前後一天內其 DC 比例大致落在 10~30%之間，而 SI 珊珊個案在 SI 開始前僅有零星 DC，直到 SI 開始後 DC 才開始逐漸增加至 15~30%。在颱風增強開始後，DL 象限兩者的深對流降水比例相當，甚至在部分時刻 SI 個案高於 RI 的個案。而在 UL 象限中，增強開始前 RI 及 SI 個案的對流性降水皆寥寥

無幾，一直到增強開始後 RI 之個案其 DC 比例才開始增加。圖 3-39 顯示蘇力基颱風及珊珊颱風增強前後 24 小時內 ST、WE 在四個象限當中分別占 3RMW 內總格點數之比例變化。我們發現在 UR 及 DR 兩象限中，兩颱風個案在多數時間內 ST 的比例小於 50%，而圖 3-38 亦顯示 UR 及 DR 象限對流性降水之格點比例相當小，此意味著此兩象限大部分區域在增強前後 24 小時時間內大多數格點處於無降水的狀態。

在圖 3-39 中我們亦可發現 DL 象限中 RI 颱風個案的 ST 所占總面積比例逐漸下降，而 SI 颱風個案則維持在 30~50% 之間。至於在 UL 及 UR 象限，我們發現在增強開始後，RI 及 SI 的個案 ST 所佔總面積之比例由 5~10% 增加至約 10~30%。

Alvey et al. (2020) 發現颱風上風切處原先較為乾燥，較不適合對流的發展並限制了颱風的強度發展，在 RI 的個案中，DL 的水氣透過颱風的氣旋式風場平流至 UL 甚至 UR 象限。由圖 3-39 我們發現颱風 UL 象限在 RI 開始後 ST 的比例開始逐漸增加，藉由 ST 增濕颱風的上風切處，使得颱風內核的降雨分佈及潛熱加熱更加地軸對稱且更有效率，颱風上風切處增濕過後更有利於上風切處強對流的發展與維持，從圖 3-38 中我們也發現在 RI 開始後 10~12 小時颱風 UL 象限的 DC 有明顯增加的趨勢，ST 與 DC 的增加使得颱風內核處的潛熱加熱更加軸對稱，並進一步將大量的可用能量轉化旋轉動能，使得 RI 的颱風個案具有更高的增強速率。然而在 SI 的個案中，在 SI 開始的初期其上風切處的增濕並不明顯，一直到 SI 開始後接近 12 小時其上風切處的層狀降水才有逐漸增加的趨勢。由於 SI 個案的颱風上風切處長期處在較為乾燥的環境，颱風的對流較侷限於下風切處，其颱風內核的潛熱加熱效率較差，使得颱風的增強速率相對較低。

3.4 WRF 模擬控制組 RI 與 SI(伴隨 RI 之個案)之結果比較

在 3.3 節的比較中，雖已將 RI（蘇力基颱風）與 SI（珊珊颱風）個案其雲微物理及降水等相關參數進行比較，並獲取初步之成果。惟在不同颱風個案之間，其所處之環境亦可能影響到颱風內部相關降水及雲微物理之過程。因此在本節，將比較蘇力基單一颱風之 RI 與 SI 的過程，並進一步檢視 SI 後發生 RI 與 SI 後並無發生 RI 的颱風個案之間其在空間及時間序列上降水及雲微物理有何差異性。

圖 3-40(a)~(d)及圖 3-41(a)~(d)分別顯示了蘇力基颱風(2021)在 SI 前 12 小時、SI 開始當下、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時 IWP 及 RWP 在 3RMW 內分布的情形。在此分析時間縮短至 SI 前 12 小時至 SI 後 24 小時，主要肇因於蘇力基颱風的 SI 發生在其生成初期，若欲持續增加 SI 前的分析時段，則可能使用到模式 spin-up 階段的資料，其並不適合用來分析。

自圖 3-40 及圖 3-41 我們發現，蘇力基颱風在 SI 開始前對流的分佈相對鬆散，且多數對流集中在上風切處，一直到 SI 開始後其下風切處的 IWP 及 RWP 才開始逐漸增加，而上風切處的零星對流則逐漸消失。在蘇力基個案中其 SI 開始前 12 小時 IWP 及 RWP 的分佈位置與珊珊颱風的個案有所不同。這可能肇因於蘇力基颱風生成後不久即開始發生 SI，其對流的分佈仍較鬆散不具組織性，而珊珊颱風則是生成後強度持平一段時間，才開始發生 SI。若比較 SI 與 RI 的颱風個案，我們發現在增強開始前 12 小時至增強開始的這段時間，不論是蘇力基或是珊珊颱風其 IWP 及 RWP 在下風切處的平均量值及高量值的分佈面積均明顯低於蘇力基發生 RI 前的 IWP 與 RWP。

而在 SI 開始後，不論蘇力基颱風(2021)或珊珊颱風(2018)其具有強 IWP 與 RWP 的位置仍主要分佈於 DR 或 DL 象限，不若 RI 的颱風個案在增強開始後上風切處的 IWP 與 RWP 有明顯增加的趨勢。同時自圖 3-42(a)~(d)及圖 3-43(a)~(d)分別顯示了蘇力基颱風在 SI 前 12 小時、SI 開始當下、SI 後 12 小時以及 SI 後

24 小時 IWC 及 RWC 在 3RMW 內之垂直分布的情形。我們從中觀察到蘇力基颱風不論在 SI 前或後較大 IWC 及 RWC 的範圍主要集中在 1RMW 內。而在 RI 的階段中蘇力基颱風在 RI 開始後颱風的風眼開始逐漸生成，圖 3-28(c)~(e)及圖 3-30 (c)~(e)顯示 1RMW 內的強對流逐漸消失，取而代之的則是 1~2RMW 之間的 IWC 及 RWC 逐漸增加。若對比 RI 與 SI 開始後 12 小時及 24 小時，我們亦可明顯發現 RI 階段的 IWC 與 RWC 的平均量值明顯多於 SI 階段，藉由檢視圖 3-32 及圖 3-44 我們可發現蘇力基颱風不論是在增強開始前或後，其 RI 階段在垂直方向上的潛熱加熱亦明顯多於 SI 階段。RI 前颱風在垂直方向上具有更多的 IWC 與 RWC 有利於更大量的潛熱加熱颱風內核，並進一步引發後續的快速增強。

圖 3-45 中我們亦可發現，在蘇力基颱風 SI 開始前 IWP 與 RWP 並無在特定象限有較強的趨勢，直到 SI 後 12 小時 DR 與 DL 象限的 IWP 與 RWP 才有明顯增加的趨勢。相較於蘇力基颱風 RI 階段與珊珊颱風的 SI 階段，我們發現蘇力基颱風位處 SI 階段時，其 IWP 與 RWP 平均量值較低，且不似蘇力基颱風 RI 階段與珊珊颱風的 SI 階段 IWP 與 RWP 有集中在下風切處的趨勢。而這可能也與颱風仍為處生成初期階段有關，雖已進入緩慢增強的階段，但其仍未有較顯著的對流發展。

圖 3-47 及圖 3-48 檢視了颱風降雨類型佔 3RMW 內總格點的變化趨勢，其顯示蘇力基颱風 SI 開始後 DC 的比例在 DR 及 DL 象限有開始逐漸增加的趨勢。而與 RI 的階段相比其 DC 比例仍明顯較低，特別是在 DL 及 UL 象限。圖 3-48 可見蘇力基颱風 SI 階段為處下風切處兩象限的 ST 比例則大致維持在 10~20%，而上風切處的層狀降水則有逐漸下降的趨勢。此亦顯示雖著 SI 的發生，降水不論層狀或對流性降水有越來越集中在下風切處的趨勢。

藉由檢視不同的 SI 個案，我們發現雲微物理參數與降水類型的分佈與趨勢雖隨著個案之間仍存在一定的差異，但仍具有一定的相似性。SI 開始後兩個個案之 IWP、RWP 及 DC 均較集中在下風切處，不似 RI 的颱風個案 IWP、RWP 及

DC 比例在 RI 開始後上風切處有逐漸增加的趨勢。



第四章、冷暖雲微物理參數法敏感度實驗

4.1、WRF 冷暖雲微物理參數法 RI 個案之比較

為了進一步探討冷雲及純暖雲微物理參數法對於 RI 及 SI 颱風個案的影響，本研究除針對 RI 及 SI 個案執行控制組冷雲參數法的模擬，亦使用僅考慮暖雲之微物理參數法的 Kessler scheme (Kessler, 1969)，分別執行 RI 個案(蘇力基颱風)及 SI 個案(珊珊颱風)之敏感度實驗模擬。本章節將分別就 RI 個案及 SI 個案其控制組與純暖雲之實驗組，進行比較與論述。

由於在 Kessler scheme 中並沒有冰相粒子的存在，冰相粒子融化所造成的相關雲微物理及熱力作用也一併排除在 Kessler scheme 中。Zhu and Zhang(2006)指出，由於融化的過程會冷卻大氣，因此沒考慮融化過程的雲微物理參數化法將會使得颱風內核周遭的環境變得更潮濕溫暖，更潮濕溫暖的大氣有利於在颱風內核產生更多的潛熱加熱，此效益有利於在模式模擬中使颱風增強地更劇烈或提早開始增強。

使用不同雲微物理參數法進行颱風的模擬時，不同雲微物理參數法針對粒子大小、形狀的假設及終端落速之差別會造成模擬結果的差異。有鑑於此，本研究曾試圖關閉 WDM6 內部之冷雲過程，希望藉由相同的雲微物理參數法，關閉其冷雲過程探討冷雲及暖雲過程分別對於快速增強與緩慢增強颱風有何差異。然而雲微物理參數法中的假設及物理過程相當複雜。若在未知 WDM6 作者設計此參數法時針對冷雲過程與暖雲過程或其他物理過程之關聯就貿然關閉冷雲過程，可能產生錯誤的研究結果，或誤將最終的結果錯認為冷暖雲過程之差異所致。因此，最終仍在控制組與暖雲實驗組的研究分別採用了不同的雲微物理參數法。

針對 RI 個案的模擬當中，我們發現如果使用純暖雲微物理參數法進行模擬，颱風的快速增強同樣會發生，但會大幅提早颱風發生 RI 的時間點與颱風的增強速率。在圖 4-1 當中，不同顏色之虛線表示不同微物理參數法中 RI 開始的時間。由圖 4-1 可見，使用暖雲方案的實驗組其 RI 的時間點比冷雲方案大幅提早了約

1.5 天的時間，而此結果與 Hausman et al. (2006)模擬結果類似，其亦發現在使用純暖雲微物理參數法執行的模擬中，颱風增強發生的時間點會提早。同時由圖 4-2 中我們亦發現，使用暖雲參數法進行模擬的颱風其 RMW 內縮的速率較使用冷雲過程的控制組實驗來得快，且其 RMW 及颱風強度亦較快達到穩定態(steady state)。

圖 4-3(a)及(b)我們比較了蘇力基颱風暖雲實驗組及控制組 3RMW 範圍內雨水路徑(RWP)在颱風不同象限中隨時間的變化情況，我們發現在暖雲實驗中，颱風的 RWP 在發生 RI 前 6~18 小時主要集中在 DR 象限。與控制組實驗雷同的是，其在颱風發生快速增強之前，颱風的對流亦有發生大幅減弱的現象，然此現象發生的時間點略早於控制組的結果。而在 RI 開始後，其 DL 與 UL 象限的 RWP 大量增加；我們發現在暖雲實驗組中，模式會產生相當大量的雨水，導致暖雲實驗組的 RWP 不僅量值大於控制組的 RWP，具有高 RWP 的格點在空間上的分佈亦較控制組來的更廣。

為了進一步探討雨水在垂直方向上的分佈及演變與控制組的差異，我們分別於 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始當下、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時將雨水含量(RWC)取軸對稱平均後，分析其在垂直方向上及 3RMW 內分布的情形。圖 3-30(a)~(e)和圖 4-4(a)~(e)分別為蘇力基颱風冷雲控制組及暖雲敏感度實驗組在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時其 RWC 取軸對稱平均後垂直方向上及 3RMW 內分布的情形。

我們發現在暖雲實驗組中，其 RWC 的分佈可一路向上延伸至 12 公里，甚至在 RI 前 12 小時及 RI 開始的時間點可向上延伸到 15 公里，此與控制組相當不同。由圖 3-25 我們發現，在控制組當中其 RWC 主要分布在溶解層以下(即 7~8 公里以下)；同時我們亦觀察到，暖雲實驗中多數時間 RWC 平均的量值以及具有高 RWC 的面積皆大於控制組的模擬結果。

在圖 4-5(a)及(b)中，我們進一步探討蘇力基颱風在實驗組與控制組中颱風 2RMW 內所有格點平均後，RI 發生前後 24 小時其 RWC 在垂直上分佈隨時間的

演變過程。我們發現在暖雲實驗組中，RWC 主要分布在 12 公里以下且其平均量值多數時間皆較控制組來的大，且在 RI 發生後有逐漸增加的趨勢。然而在控制組中，如同上段所敘，RWC 主要分布在溶解層以下(即 7~8 公里以下)，且其隨時間之變化較不連續，偶有較強之 RWC 出現，而暖雲組無此快速消長的情形。暖雲實驗中產生了大量的雨水，不僅 RWC 垂直上分佈的更廣，且水平空間上具有更多 RWC，進而導致實驗組及控制組在 RWC 有明顯差異。

雨水或冰晶等物質在發生相變的過程往往伴隨著潛熱的釋放或吸收。Wu et al.(2020)透過衛星觀測及 WRF 模擬指出，潛熱釋放的量與位置更是和颱風的當下及未來的強度息息相關。在圖 4-6(a)及(b)中，我們分別探討蘇力基颱風在暖雲實驗組與控制組中颱風 3RMW 範圍內平均後，RI 發生前後 24 小時其由雲微物理參數法造成潛熱的加熱在垂直上分佈隨時間的演變時序圖。在暖雲實驗組中，大量的 RWC 伴隨垂直方向上 1~15 公里大量的潛熱加熱，其潛熱加熱的量值在 RI 前後 24 小時內大致維持一定的量值，且在 RI 開始後有略微增加的趨勢。相較之下，冷雲控制組的潛熱加熱量值隨時間變化較不連續，且其多數時間之平均量值亦較暖雲實驗組來的低。在冷雲控制組中，RI 前 6 小時至 RI 開始的這段時間，其對流大幅減弱亦伴隨其潛熱加熱的量值減弱，而暖雲實驗組中 RI 前數小時潛熱加熱量值減弱的情形較不明顯。

承如第三章所進行的降水類型比較，在此我們亦透過 Wu et al. (2022)降水類型分類的方式針對暖雲實驗組及冷雲控制組的降水類型進行比較。圖 4-7 (a)~(e)分別顯示了暖雲實驗中蘇力基颱風在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始當下、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時其降水類型 3RMW 內的分佈情形。圖 3-29 (a)~(e)顯示冷雲控制組中蘇力基颱風在 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始當下、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時其降水類型 3RMW 內的分佈情形。在暖雲實驗中，RI 前 24 小時 3RMW 內以 DL 及 DR 象限的層狀降水為主；到 RI 前 12 小時 DL 象限有 DC 及 MC 開始發展；RI 開始之後 UL 象限亦有 DC 及 MC 開始發展。仔細比較暖雲實驗組及冷雲控制組我們發現，原先控制組 MC 相當稀少，

對流性的降水主要以 DC 為主；然而在暖雲實驗中對流降水中 DC 比例減少，取而代之的則是 MC 比例的增加。同時我們亦發現在 RI 開始後，UL、UR 甚至 DR 象限產生了遠多於冷雲控制組的 ST 降水，亦即代表在暖雲組中降水分佈的軸對稱性較控制組來得更高。圖 4-11 更進一步說明了此現象，我們發現暖雲組在 UL、UR 及 DR 象限的 ST 佔 2RMW 內總格點的比例明顯多於冷雲控制組的 ST 比例。

為了進一步比較暖雲實驗組與冷雲控制組在不同象限及不同時刻之降雨類型差異，我們再次計算四個象限中不同類之降水類型在總降水個點中所佔比例，及計算了不同類之降水類型在 3RMW 內中佔所有格點之比例，並繪製時序圖進行比較。圖 4-8 顯示蘇力基颱風冷雲控制組及暖雲實驗組在 RI 前後 24 小時內 DC、MC 及 SC 在四個象限當中分別佔總降水格點之比例變化，我們發現在 DR、DL 及 UL 象限中自 RI 前 24 小時至 RI 後 24 小時這段時間內，冷雲控制組 DC 的比例在多數時間內皆多於暖雲組 DC 的比例。暖雲實驗組雖然 DC 比例較低，但其具有較高比例的 MC，由此顯示考慮冷雲過程的微物理參數化法在此 RI 個案中可有效產生較深的對流，反之僅考慮暖雲的實驗中對流發展的高度及降水強度明顯較弱。而自圖 4-9 中，我們發現不論是哪個象限，暖雲實驗組有較多降水格點為 WE 的比例，此亦說明暖雲實驗中產生了較多的強度微弱的降水。同時在 DL 象限不論冷雲控制組或是暖雲實驗組，ST 比例都隨時間逐漸下降，同時暖雲實驗組的 WE 比例亦逐漸下降，這代表不論是否考慮冷雲過程，快速增強的颱風個案中其 DL 象限的對流性降水比例都有隨著颱風強度增加而上升的情形。

為了比較不同降水類型在 3RMW 內所有格點的分布變化情形，圖 4-10 顯示了 DC、MC 及 SC 在四個象限中分別佔了總格點數的比例。我們可發現在 DR、DL 象限中，多數時間暖雲組的 MC 所占面積比例(10~20%)的明顯多於 DC(0~10%)；然而冷雲控制組的結果則不同，其 DR 及 DL 象限中多數時間 DC 所占面積與 MC 接近或略多於 MC。在 RI 開始後，控制組 UL 象限的 DC 開始逐漸增加，然而暖雲組中不論 DC 或是 MC 的比例均未發現有明顯的增加。圖 4-11 進一步說明，暖雲組的實驗中，在四個象限中均產生了大量的 ST 及 WE，在

DR 跟 UR 象限中所占面積之比例更是明顯多於冷雲控制組；同時我們亦可發現在暖雲實驗中，上風切處 ST 比例和冷雲控制組一樣均有隨時間增加的趨勢，然而暖雲實驗組比例開始增加的時間點早於冷雲控制組的時間點。



4.2、WRF 冷暖雲微物理參數法 SI 個案之比較

比較完 RI 颱風個案(蘇力基)後，我們以類似的手法檢視 SI 颱風(珊珊)個案。由圖 4-12 可見，自模擬開始後至 8/4 00Z 前，暖雲實驗組及冷雲控制組的強度及增強速率差異不大，直到 8/4 00Z 後，僅有暖雲過程的實驗組強度略為減弱，和冷雲控制組的強度相差約 10kts。進一步檢視兩者 RMW 的變化及差異，由圖 4-13 我們發現在模擬初期(8/2 00Z~8/2 18Z)兩者的 RMW 內縮速率接近，隨後冷雲控制組的 RMW 逐漸達到穩定態，其 RMW 之量值大致保持在 50km 上下，而暖雲實驗組的 RMW 則略為上升後又逐漸下降，並逐漸達到穩定態，其 RMW 之量值大致保持在 100km 上下。在 SI 個案(珊珊)中，冷雲控制組及暖雲實驗組的強度及 RMW 變化趨勢較為一致，不若在 RI 蘇力基個案中，RMW 有提早並快速地內縮並伴隨強度提早增強的現象。

颱風強度變化的速率及時間點雖然會受到冷暖雲參數法的影響而有所差異，但冷暖雲過程與颱風背景環境及其內部動力之間的交互作用，亦可能導致颱風的強度及 RMW 變化趨勢有所差異，進一步造成冷雲控制組與暖雲實驗組模擬中 RI 及 SI 個案在強度及 RMW 變化的差異，而當中細節仍待後續進一步探討及研究。

圖 4-14(a)及(b)我們比較了珊珊颱風暖雲實驗組及控制組 3RMW 內 RWP 在颱風不同象限中隨時間的變化情形。在 SI 開始前，冷雲控制組的 RWP 主要集中在 DR 及 DL 象限；SI 開始後，其 RWP 則主要集中在 DL 象限且其 DL 之 RWP 量值亦有增加的趨勢。反觀在暖雲實驗組中，SI 開始前 2RMW 內的 RWP 平均量值相較冷雲控制組來的小，具有較大 RWP 之格點亦無集中在特定象限的情形；

在 SI 開始後 DL 及 DR 象限之 RWP 開始逐漸增加，但其增加幅度不如冷雲控制組。此亦與 RI 暖雲實驗組所產生的結果大相逕庭，在 RI 蘇力基暖雲實驗中，我們發現 RI 開始後，相較於冷雲控制組而言，暖雲實驗組會產生更大量的 RWP；然而在 SI 珊珊個案的暖雲實驗中，暖雲實驗組的 RWP 極值雖較冷雲控制組小，但其分佈的範圍卻較冷雲控制組廣，在 DL 及 DR 象限均有不少 RWP 存在。

我們為了進一步探討珊珊颱風(SI 個案)冷雲控制組與暖雲實驗組其雨水在垂直上的分佈演變及其差異，我們分別就 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始當下、RI 後 12 小時以及 RI 後 24 小時其 RWC 取軸對稱平均後在高度及 3RMW 內分佈的情形來討論。圖 3-31(a)~(e)為珊珊颱風冷雲控制組在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時其 RWC 取軸對稱平均後在高度及 3RMW 內分佈的情形。圖 4-15(a)~(e)為珊珊颱風暖雲實驗組在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時其 RWC 取軸對稱平均後在高度及 3RMW 內分佈的情形。

在暖雲實驗組中，我們發現 RWC 的分佈主要集中在 10 公里以下大氣。在 SI 開始前，3RMW 內之 RWC 量值約 100~400mg/g；而在颱風 SI 開始後，其 RWC 開始增加，尤其是位在颱風 1~2RMW 中 5 公里以下大氣其 RWC 之量值增加幅度較為明顯，可達 600~800mg/g。相較之下，冷雲控制組當中其 RWC 隨時間的增加較少，其 RWC 大致分布在 7 公里以下大氣，其量值則約 200~400mg/g 之間。在圖 4-14 中，我們發現雖然冷雲控制組的 RWP 極值較暖雲實驗組的 RWP 大，但其分佈的範圍較局限於 DL 象限；然而暖雲實驗組之 RWP 平均而言雖少於冷雲控制組的 RWP，但是其分佈的象限較冷雲控制組廣。這也導致了在進行軸對稱平均的計算後，SI 後 12 及 24 小時 1~2RMW 的 5 公里以下大氣暖雲實驗組 RWC 之量值多於冷雲控制組的 RWC。

在圖 4-16(a)及(b)中，我們比較珊珊颱風在暖雲實驗組與冷雲控制組中颱風 3RMW 內平均後，SI 發生前後 24 小時其由雲微物理過程造成的潛熱加熱在垂直上分佈隨時間的演變情形。在暖雲實驗組中我們發現其潛熱的加熱量值在 SI 開

始後有略為增加的趨勢，而冷雲控制組中則是隨著 3RMW 內對流消長而有間歇性地消長的情形。但整體而言，兩者在 3RMW 內垂直方向上的潛熱加熱並無明顯之差異。在 SI 個案的實驗組中，我們並未發現如 RI 暖雲實驗組中潛熱加熱大幅增加的情形。

圖 4-17 (a)~(e)及圖 3-26(a)~(e)分別顯示了暖雲實驗中及冷雲控制組中珊珊颱風在 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始當下、SI 後 12 小時以及 SI 後 24 小時其降水類型 3RMW 範圍內分佈的情形。在 SI 前 24 小時及前 12 小時，冷雲控制組與暖雲實驗組的降水大多分布在 DR 及 DL 象限，降水以層狀降水為主，當中僅有零星的對流性降水。在緩慢增強開始後，冷雲控制組下風切處的 DC 開始增加，且 UL 象限的層狀降水面積亦開始逐漸增加；而暖雲實驗組中，SI 開始後其上風切處的層狀降水面積亦有逐漸增加的現象，但其 DL 象限中 DC 並無顯著地增加，取而代之的則是 DL 及 UL 象限中 MC 面積的增加。此現象與 RI 個案中的結果類似，颱風 RI 或 SI 開始後，冷雲控制組的 DC 開始逐漸增加，然而在暖雲實驗組中 DC 並無明顯地增加，取而代之的則是 MC 面積的增加。同時我們發現不論是 RI 或 SI 個案的暖雲實驗組中，其相較於冷雲控制組均產生了大量的 ST 及 WE 降水，此現象在上風切處格外明顯。

為了進一步比較 SI 颱風個案中暖雲實驗組及冷雲控制組不同降雨類型的比例變化，承如針對 RI 颱風個案的分析方法，我們再次針對四個象限中不同類型之降水類型在總降水個點中所佔比例及不同類型之降水類型在 3RMW 內中所有點中計算比例，並繪製時序圖進行比較。圖 4-18 顯示珊珊颱風 SI 前後 24 小時內 DC、MC 及 SC 在四個象限當中分別佔總降水格點之比例變化，在 DL 象限中 SI 開始前 DC 所佔比例約 10%，在 SI 開始後則增加至 40~50%；然而在暖雲實驗組中，其 DC 的比例僅約 10%，且沒有隨著 SI 開始而增加的趨勢，反倒是 MC 在 SI 前後 24 小時占了總降水比例 10~30%，且隨著颱風的 SI 有略為增加的趨勢。同時在 DR、UR 及 UL 象限中我們亦注意到暖雲實驗組中 MC 多於 DC 的情形，這再度顯示考慮冷雲過程的微物理參數化法不僅在 RI 個案，SI 個案中亦產

生較深的對流，反之僅考慮暖雲的實驗中對流發展的高度及降水強度明顯較弱。

圖 4-19 顯示珊珊颱風 SI 前後 24 小時內 ST 及 WE 在四個象限當中分別佔總降水格點之比例變化。在四個象限中，不論冷雲控制組或是暖雲實驗組中，在 SI 前後 24 小時均有 40~80%不等的 ST 及 5~30%的 WE，顯示在總降水格點中，SI 個案仍是以層狀降水為主。而在 DL 象限中，冷雲控制組的 ST 及 WE 所佔比例隨著 SI 開始而逐漸下降，此現象亦與圖 4-18 中 DL 象限的 DC 逐漸增加相互呼應。

我們接著比較不同降水類型在 3RMW 內所有格點的分布變化情形，圖 4-20 顯示珊珊颱風 SI 前後 24 小時內 DC、MC 及 SC 類型降水在四個象限中分別佔了總格點數的比例。在 DL 象限中，我們發現不論是控制組或是暖雲實驗組中，在 SI 開始前對流性降水所占面積相當低，一直到 SI 開始後，控制組的 DC 比例才開始上升，而在暖雲實驗組中 MC 所佔的面積亦有增加的趨勢。至於上風切的 UL 及 UR 象限中，不論是控制組或暖雲實驗組，幾無觀察到明顯的對流性降水，僅暖雲實驗組 UL 象限中在 SI 開始後有觀察到少量約 5~10%的 MC。

圖 4-21 顯示珊珊颱風 SI 前後 24 小時內 ST 及 WE 類型降水在四個象限中分別佔了總格點數的比例。我們發現自增強開始前 12 小時之後上風切的兩象限中，暖雲實驗組產生了多於冷雲控制組的層狀性降水，且不論暖雲實驗組或冷雲控制組在 SI 開始後 ST 均有逐漸增加的趨勢，惟暖雲實驗組開始的實驗略早於冷雲控制組。

更多的潛熱加熱，有利模式模擬中使颱風增強地更劇烈或提早開始增強，然而自圖 4-6 我們發現在 RI 開始前 12 小時之後，暖雲實驗組中相較冷雲控制組 RI 的颱風個案明顯在中高層大氣具有較多的潛熱加熱，因而產生較大之增強速率。然而圖 4-16 則顯示 SI 的颱風個案在暖雲實驗組中相較冷雲控制組 RI 的颱風個案差異不大，且冷雲控制組在增強開始後具有較高之潛熱加熱。兩個案之潛熱加熱的差異性或許是導致增強開始發生的時間點及增強速率之變化有所差異的主要原因之一；然而暖雲方案如何對不同增強速率之颱風造成不同的影響，仍有待

進一步探討深究。



第五章、結論

本研究以 WRF 數值模式模擬以及 SSMIS 衛星所得相關雲微物理參數及降水相關變數，針對快速增強(RI)與緩慢增強(SI)之颱風進行比較探討。其中 RI 與 SI 個案分別挑選十個颱風個案進行衛星資料合成分析後，我們再分別針對挑出觀測資料較多的 RI 個案蘇力基颱風(2021)及 SI 個案珊珊颱風(2018)，進行 WRF 模式模擬以及純暖雲微物理參數法實驗模擬，針對這兩個颱風在空間及時間上特性演變特徵進行比較探討。過去針對 RI 及 SI 個案的降水與雲微物理特性在時間及空間演變之相關研究甚少，且多針對 RI 與非 RI 個案進行探討與比較。此係本論文研究獨特且創新之處，希冀針對初生成強度類似但卻具有不同增強速率之颱風，能有更進一步的認識與瞭解。

由 SSMIS 衛星資料的合成分析結果我們發現，在颱風增強的前 12 小時、後 12 小時以及後 24 小時的合成分析中，RI 的颱風在內核(2RMW)內四個象限中其 IWP 及 RWP 均大於 SI 颱風的結果，且其差異在 95%信心水準下具有統計意義。其中我們發現 RI 的颱風在 RI 開始前後，會有對流減弱造成 IWP 及 RWP 同步減弱的情形，此現象造成 RI 與 SI 颱風之間 IWP 與 RWP 具有統計性差異之分佈限縮至 RMW 內。至於衛星紅外亮溫之觀測亦指出，在增強前 12 小時 RI 的颱風個案其 2RMW 內亮溫已低溫 SI 之個案，並在增強開始前後的時間點兩者的差異性已開始具有統計之意義。在 IWP/RWP 的合成分析中，對流減弱現象與 Munsell et al. (2021)透過衛星紅外亮溫分析結果類似。然而在本研究之亮溫合成分析中則並無類似現象，Munsell et al. (2021)的觀測分析指出紅外亮溫上升的時長僅數十分鐘，而本研究中合成分析的間隔為 12 小時，可能造成此現象無法被解析，但合成分析中 IWP/RWP 減弱與亮溫發生變化之時長及發生時間點之差異，其背後成因仍有待進一步的研究與探討。

不論在 WRF 模式模擬中或 SSMIS 衛星資料合成分析中，我們發現不論是 RI 或 SI 的個案，在颱風強度發生增強之前高 IWP 及 RWP 主要分佈在下風切處，

尤其是 DL 象限。隨著颱風 RI/SI 的發生，我們發現在 RI 的 WRF 模擬以及衛星合成分析中其 UL 象限的 IWP 及 RWP 開始增加，意味著其上風切處的對流與降水逐漸發展；然而在 SI 颱風的模擬及合成分析中，並未有類似的現象發生。而此現象顯示 RI 颱風個案的對流及降水分佈具有更高的軸對稱性，此與過去之研究結果相近。同時亦有相關研究指出，較高軸對稱率颱風之對流及降水往往對應到更高的增強速率。

在 WRF 模擬的分析中，我們進一步透過模擬的雷達回波值推估降水類型，於初步分類為對流性及層狀降水後，再進一步將對流性降水分為深對流(DC)、中等對流(MC)及淺對流(SC)類型；而層狀降水則再分為層狀降水(ST)及弱回波(WE)類型。我們發現 DL 象限中，SI 颱風個案(珊珊)在 SI 開始前幾乎沒有 DC 類型存在，一直到 SI 開始後其 DC 比例逐漸上升至約 50%。而在 UL 象限中，RI 颱風個案在 RI 開始前幾乎不存在 DC 降水，直到 RI 開始後其 DC 的比例開始逐漸增加。然而在 SI 颱風個案中，其上風切象限在 SI 前後 24 小時內，不論是 UL 或 UR 象限幾乎沒有 DC 降水存在。

在不同 SI 颱風個案的與 RI 颱風個案的比較中，我們發現在 SI 開始後兩個個案之 IWP、RWP 及 DC 仍較集中在下風切處，不似 RI 的颱風個案 IWP、RWP 及 DC 比例在 RI 開始後上風切處有逐漸增加的趨勢。

同時我們亦發現，颱風在 RI 及 SI 開始前上風切處並無顯著之降水情形，然而在 RI 及 SI 開始後颱風上風切處之 ST 佔總格點數之比例有開始上升之趨勢，此與 Alvey et al. (2020)之發現部份相近，亦有部份不同。本研究與其研究皆指出 RI 個案 RI 開始後，其上風切處之 ST 比例開始增加；然而 Alvey et al. (2020)之研究指出非屬 RI 個案無此情形，然而在本研究中 SI 之個案亦有上風切處 ST 比例增加之情形。此原因可能來自 Alvey et al. (2020)其分類為 RI 與非 RI 颱風之差異，然而本研究係針對 RI 與 SI 個案討論，而非 RI 之個案包含 SI、NT 及 WK 等三類，此為可能造成兩者結果差異的原因之一。或是本研究與 Alvey et al. (2020)之研究針對降雨類型分類方法存在些微差異，進而導致計算出之比例有所差異。

本研究亦針對 RI 與 SI 颱風個案分別執行純暖雲微物理參數法之模擬實驗組與冷雲參數法控制組進行比較探討。我們發現在暖雲實驗組中，RI 個案(蘇力基)發生 RI 的時間大幅提前約 1.5 天，然而 SI 個案(珊珊)暖雲實驗組發生 SI 的時間點則大致與冷雲控制組雷同。

在 RI 個案暖雲實驗組與冷雲控制組的比較中，我們發現暖雲實驗組在 RI 開始後其產生的 RWP 多於冷雲控制組之 RWP，且其 RWP 在空間上之分佈亦略廣於冷雲控制組。在 SI 個案(珊珊)的比較中，我們發現 SI 開始後，暖雲實驗組的 RWP 極值雖較冷雲控制組小，但其分佈的範圍卻較廣，不論在 DL 及 DR 象限均有一定量值之 RWP 存在。

而藉由降水類型的分類與比較，我們發現不論是 RI 或是 SI 的颱風個案，暖雲的實驗組均傾向產生較多的雨水，且其層狀的降水的比例多於冷雲控制組的比例。同時在暖雲實驗組中，颱風增強開始後其 DC 降水類型的比例往往低於冷雲控制組。而 MC 降水類型，則多於冷雲控制組，此現象反應出暖雲參數法中所產生的對流及降水強度低於具有冷雲參數法的控制組。

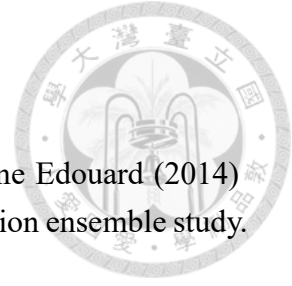
圖 5-1(a)與(b)分別為 RI 與 SI 颱風分別在增強前後的概念模式圖。概念模式圖中顯示，RI 與 SI 的颱風個案對流均較集中於下風切處，然而 RI 的颱風個案相較 SI 的颱風個案具有較多的 IWP 與 RWP 及降水的面積。增強過後，RI 的颱風個案在 UL 象限的 IWP 與 RWP 增加並伴隨降水面積的增加，高層與低層的中心逐漸對準重合，上風切處的層狀降水逐漸濕化 UL 的中高層大氣，使得 UL 處的對流可以維持並產生更軸對稱而有效率的加熱(Alvey et al. 2020)；而 SI 的颱風個案 IWP 與 RWP 和降水仍然以下風切處為主，高層與低層的中心仍然傾斜並未對準重合(Alvey et al. 2020)，但其 IWP 與 RWP 亦有逐漸增加的趨勢。

在對雲微物理過程之認知與模擬仍有侷限性的情況下，本研究發現 WRF 模擬之冰與雨水均有多於衛星觀測估計值之趨勢，然而在缺乏飛機實際觀測之情形下，在不同環境時空背景下，孰是孰非仍有待後續研究進一步確認。受限於繞極軌道衛星數量及掃瞄範圍的限制，我們難以針對單一個案進行長時間的觀測與分

析，也難以獲得大量的觀測數據進行合成分析。未來可進一步檢視不同繞極衛星所酬載儀器之間觀測的差異性，若不同規格儀器之間針對多個颱風個案均有類似觀測結果，未來可進一步提升 RI 與 SI 颱風個案數量，並有助於提升差異之代表性。同時繞極衛星針對颱風掃描時，颱風位置是否位處衛星觀測星下點亦可能造成解析度及觀測之誤差。

在 WRF 模式模擬中，本研究僅選取各一個 RI 與 SI 颱風個案進行模擬，當中雲雨降水之過程不確定性依然存在，同時 WRF 模式中由於空間解析度之限制、模式本身之數值誤差及雲微物理過程之假設前提限制等，均會在模擬雲微物理過程造成一定程度的誤差，導致部分更細微物理尺度之現象無法被精確解析，因此其比較結果是否可類推至其他 RI 或 SI 個案之情形，仍有待後續進一步研究加以研究探討。承如 Fovell et al.(2009)及 Li et al.(2022)的研究，在給定粒子不同的終端落速後，其所相應產生的對流結構、降水及潛熱加熱亦有所不同。而本研究針對暖雲實驗組 (Kessler scheme) 採用與控制組(RI 個案採用 WDM6; SI 個案採用 WSM6)不同的雲微物理參數法，不同雲微物理參數法之間終端落速假設的差異亦可能對研究結果產生影響。

參考文獻



Alvey, G. R., E. Zipser, and J. Zawislak, 2020: How does Hurricane Edouard (2014) evolve toward symmetry before rapid intensification? A high-resolution ensemble study. *J. Atmos. Soc.*, **77**, 1329–1351.

Bu Y., 2012: Factors That Can Influence the Onset Time of Rapid Intensification of Tropical Cyclones, University of California Los Angeles Master Thesis.

Cecil, D. J., and E. J. Zipser, 1999: Relationships between tropical cyclone intensity and satellite-based indicators of inner core convection: 85-GHz ice-scattering signature and lightning. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 103–123.

Corbosiero, K. L., and J. Molinari, 2002: The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2110–2123.

Corbosiero, K. L., and J. Molinari, 2003: The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 366–376.

Churchill, D. D., and R. A. Houze Jr., 1984: Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 933–960.

DeHart, J. C., R. A. Houze, and R. F. Rogers, 2014: Quadrant distribution of tropical cyclone inner-core kinematics in relation to environmental shear. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2713–2732.

Didlake, A. C., and R. A. Houze Jr., 2009: Convective-scale downdrafts in the principal rainband of Hurricane Katrina (2005). *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3269–3293.

Didlake, A. C., and R. A. Houze Jr., 2013a: Convective-scale variations in the innercore rainbands of a tropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 504–523.

Emanuel, K., DesAutels, C., Holloway, C., Korty, R., 2004: Environmental control of tropical cyclone intensity. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 843–858.

Fovell, R. G., K. L. Corbosiero, and H. C. Kuo, 2009: Cloud microphysics impact on hurricane track as revealed in idealized experiments, *J. Atmos. Sci.*, **66**, 1764–1778.

Fovell, R. G., K. L. Corbosiero, A. Seifert, and K.-N. Liou, 2010: Impact of cloud-radiative feedback on hurricane track, *Geophysical Research Letters*, **37**, L07,808.

Frank, W. M., and E. A. Ritchie, 2001: Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2249–2269.

Fritz, C., Z. Wang, S. W. Nesbitt, and T. J. Dunkerton, 2016: Vertical structure and contribution of different types of precipitation during Atlantic tropical cyclone formation as revealed by TRMM PR. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 894–901

GPM Science Team (2016), GPM SSMIS on F16 (GPROF) Radiometer Precipitation Profiling L2 1.5 hours 12 km V05, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed:[**February 11, 2023**],10.5067/GPM/SSMIS/F16/GPROF/2A/05

GPM Science Team (2016), GPM SSMIS on F17 (GPROF) Radiometer Precipitation Profiling L2 1.5 hours 12 km V05, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed:[**February 11, 2023**],10.5067/GPM/SSMIS/F17/GPROF/2A/05

GPM Science Team (2016), GPM SSMIS on F18 (GPROF) Radiometer Precipitation Profiling L2 1.5 hours 12 km V05, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed:[**February 11, 2023**],10.5067/GPM/SSMIS/F18/GPROF/2A/05

Hausman, S. A., K. V. Ooyama, and W. H. Schubert, 2006: Potential vorticity structure of simulated hurricanes, *J. Atmos. Sci.*, **63**, 87–107.

Hence, D. A., and R. A. Houze, 2012: Vertical structure of tropical cyclone rainbands as seen by the TRMM Precipitation Radar. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2644–2661.

Hendricks, E. A., Peng, M. S., Fu, B. and Li, T., 2010: Quantifying Environmental Control on Tropical Cyclone Intensity Change. *Monthly Weather Rev.* **138**, 3243–3271.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999–2049.

Homeyer, C. R., Fierro, A. O., Schenkel, B. A., Didlake, A. C., McFarquhar, G. M., Hu, J., Ryzhkov, A. V., Basara, J. B., Murphy, A. M., and Zawislak, J., 2021: Polarimetric Signatures in Landfalling Tropical Cyclones, *Mon. Weather Rev.*, **149**, 131–154.

John Janowiak, Bob Joyce, Pingping Xie (2017), NCEP/CPC L3 Half Hourly 4km Global (60S - 60N) Merged IR V1, Edited by Andrey Savtchenko, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [**February 11, 2023**], 10.5067/P4HZB9N27EKU.

Kaplan, J., and M. DeMaria, 2003: Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, **18**, 1093–1108.

Kaplan, J., M. DeMaria, and J. A. Knaff, 2010: A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, **25**, 220–241.

Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance on atmospheric circulation. *Meteorol. Monogr.*, **32**, 84.

Li, Y., Li, J., Ping, F., and Gao, Z. (2022). Influence of the terminal velocity of graupel on the simulation of a convective system over Beijing. *Atmos. Res.* 274, 106181.

Li, X., and Z. Pu, 2008: Sensitivity of numerical simulation of early rapid intensification of hurricane emily (2005) to cloud microphysical and planetary boundary layer parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 48194838.

Liu, C. Y., Punay, J. P., Wu, C. C., Chung, K. S. and Aryastana, P., 2022: Characteristics of deep convective clouds, precipitation, and cloud properties of rapidly intensifying tropical cyclones in the western North Pacific. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2022JD037328.

Lord, S. J., H. E. Willoughby, and J. M. Piotrowicz, 1984: Role of a parameterized ice-phase microphysics in an axisymmetric, non-hydrostatic tropical cyclone model. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2836–2848.

Miyamoto, Y., and T. Takemi, 2013: A transition mechanism for the axisymmetric spontaneous intensification of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 112–129.

Montgomery, M. T., and R. J. Kallenbach, 1997: A theory for vortex rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **123**, 435-465.

Munsell, E. B., Braun, S. A., and Zhang, F., 2021: GOES-16 Observations of Rapidly Intensifying Tropical Cyclones: Hurricanes Harvey (2017), Maria (2017), and Michael (2018). *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 1696–1714.

Nolan, D. S., Miyamoto, Y., Wu, S., and Soden, B. J., 2019: On the correlation between Total condensate and moist heating in tropical cyclones and applications for diagnosing intensity. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 3759–3784.

Richardson J. C., R. D. Torn, and Brian H. Tang, 2022: An Analog Comparison between Rapidly and Slowly Intensifying Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 2139–2159.

Rogers, R. F., P. D. Reasor, J. A. Zawislak, and L. T. Nguyen, 2020: Precipitation processes and vortex alignment during the intensification of a weak tropical cyclone in moderate vertical shear. *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 1899–1929.

Schubert, W. H., Montgomery, M.T., Taft, R.K., Guinn, T.A., Fulton, S.R., Kossin, J.P., Edwards, J.P., 1999: Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction and potential vorticity mixing in hurricanes. *J. Atmos. Sci.* **56**, 1197–1223.

Shi, D., and Chen, G., 2021: The implication of outflow structure for the rapid intensification of tropical cyclones under vertical wind shear. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 4107–4127.

Steiner, M., R. A. Houze Jr., and S. E. Yuter, 1995: Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1978–2007.

Tao, C., and H. Jiang, 2015: Distributions of shallow to very deep precipitation–convection in rapidly intensifying tropical cyclones. *J. Climate*, **28**, 8791–8824.

Wadler, J. B., J. A. Zhang, B. Jaimes, and L. K. Shay, 2018b: Downdrafts and the evolution of boundary layer thermodynamics in Hurricane Earl (2010) before and during rapid intensification. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 3545–3565.

Wadler, J. B., J. A. Zhang, R. F. Rogers, B. Jaimes, and L. K. Shay, 2021: The rapid intensification of Hurricane Michael (2018): Storm structure and the relationship to environmental and air–sea interactions. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 245–267.

Wang, M.; Zhao, K.; Pan, Y.; Xue, M., 2020: Evaluation of simulated drop size distributions and microphysical processes using polarimetric radar observations for landfalling Typhoon Matmo (2014). *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, 1–20.

Wingo, M. T. and D. J. Cecil, 2010: Effects of Vertical Wind Shear on Tropical Cyclone Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 645–661.

Wu, S.-N., B. J. Soden, Y. Miyamoto, D. S. Nolan, and S. A. Buehler, 2021: Using satellite observations to evaluate the relationships between ice condensate, latent heat release, and tropical cyclone intensification in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 113–129.

Wu, Y.-C., M.-J. Yang, and R.F. Rogers, 2022: Examining Terrain Effects on the Evolution of Precipitation and Vorticity of Typhoon Fanapi (2010) after Departing the Central Mountain Range on Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 1517–1540.

Yanai, M., Esbensen, S. and Chu, J.-H., 1973: Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets. *J. Atmos. Sci.* **30**, 611–627.

Yuter, S. E., and R. A. Houze Jr., 1995: Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distribution of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1941–1963.

Zhu, T., and D.-L. Zhang, 2006: Numerical simulation of Hurricane Bonnie (1998). Part II: Sensitivity to varying cloud microphysical processes. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 109–126.

表



RI case	ΔV lifetime max(kts)	V_{max} lifetime(kts)
黃蜂 VONGFONG(2014)	65	155
哈格比 HAGUPIT(2014)	65	155
鸚鵡 NURI(2014)	75	155
蘇迪勒 SOUDELOR(2015)	55	155
天鵝 GONI(2015)	60	120
茉莉 MELOR(2015)	60	125
瑪麗亞 MARIA(2018)	75	145
哈隆 HALONG(2019)	73	165
利奇馬 LEKIMA(2019)	50	135
天鵝 GONI(2020)	75	170
蒲公英 MINDULLE(2021)	68	144
蘇力基 SURIGAE(2021)	60	165

表 3-1 SSMIS 衛星合成 RI 個案列表。由左至右排序，第一行為颱風之中文譯名及英文名稱及其活躍年份，第二行為其生命期內單日最大增強速率，第三行則為其生命期內最高十米風值。

RI case(14)		-24h	-12h	0h	+12h	+24h
黃蜂	VONGFONG(2014)	V	V	V	V	V
哈隆	HALONG(2014)	V		V		V
浣熊	NEOGURI(2014)	V				
哈格比	HAGUPIT(2014)	V	V		V	
鸚鵡	NURI(2014)		V	V	V	
蘇迪勒	SOUDELOR(2015)			V	V	V
天鵝	GONI(2015)	V	V	V	V	V
茉莉	MELOR(2015)	V	V			V
瑪麗亞	MARIA(2018)	V	V	V	V	V
哈隆	HALONG(2019)	V		V	V	V
利奇馬	LEKIMA(2019)	V	V	V	V	V
天鵝	GONI(2020)		V	V	V	
蒲公英	MINDULLE(2021)		V			V
蘇力基	SURIGAE(2021)	V	V	V	V	V

表 3-2 SSMIS 衛星合成 RI 個案列表。時間由左至右排序分別為 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 24 小時、RI 後 24 小時，此表顯示不同時間點合成的颱風列表。

RI case(14)		-24h	-12h	0h	+12h	+24h
黃蜂	VONGFONG(2014)	75	60	55	55	37
哈隆	HALONG(2014)	46		55		37
浣熊	NEOGURI(2014)	93				
哈格比	HAGUPIT(2014)	93	100		40	
鸚鵡	NURI(2014)		75	85	75	
蘇迪勒	SOUDELOR(2015)			55	46	37
天鵝	GONI(2015)		65	46	46	20
茉莉	MELOR(2015)	60	75			25
瑪麗亞	MARIA(2018)	130	146	124	55	39
哈隆	HALONG(2019)	100		52	39	34
利奇馬	LEKIMA(2019)	75	96	33	46	31
天鵝	GONI(2020)	45	36	55	80	
蒲公英	MINDULLE(2021)		55			46
蘇力基	SURIGAE(2021)	70	37	33	51	37
使用個案之平均 RMW		78.7	74.5	59.3	53.3	34.3

表 3-3 SSMIS 衛星合成 RI 個案之 RMW(單位為 km)。時間由左至右排序分別為 RI 前 24 小時、RI 前 12 小時、RI 開始、RI 後 24 小時、RI 後 24 小時。



SI case(16)	ΔV lifetime max(kts)	V_{max} lifetime(kts)
艾維尼 EWINIAR(2012)	15	55
卡努 KHANUN(2012)	15	55
潭美 TRAMI(2013)	20	75
雅吉 YAGI(2013)	20	55
北冕 KAMMURI(2014)	20	55
彩雲 CHOIWAN(2015)	15	70
巴威 BAVI(2015)	15	50
燦樹 CHANTHU(2016)	20	60
莫柏 MERBOK(2017)	15	45
蘇拉 SAOLA(2017)	25	65
珊珊 SHANSHAN(2018)	25	80
塔巴 TAPAH(2019)	20	65
白鹿 BAILU(2019)	15	60
范斯高 FRANCISCO(2019)	20	80
巴威 BAVI(2020)	25	100
閃電 ATSANI(2020)	15	50

表 3-4 SSMIS 衛星合成 SI 個案列表。由左至右排序，第一行為颱風之中文譯名及英文名稱及其活躍年份，第二行為其生命期內單日最大增強速率，第三行則為其生命期內最高十米風值。

SI case(16)	-24h	-12h	0h	+12h	+24h
艾維尼 EWINIAR(2012)			V		V
卡努 KHANUN(2012)	V			V	V
潭美 TRAMI(2013)		V		V	V
雅吉 YAGI(2013)	V	V	V		V
北冕 KAMMURI(2014)	V	V	V	V	
彩雲 CHOIWAN(2015)		V	V	V	V
巴威 BAVI(2015)	V			V	
燦樹 CHANTHU(2016)	V	V	V	V	
莫柏 MERBOK(2017)	V				
蘇拉 SAOLA(2017)		V			V
珊珊 SHANSHAN(2018)	V	V	V	V	V
塔巴 TAPAH(2019)	V	V	V	V	V
白鹿 BAILU(2019)	V	V	V	V	V
范斯高 FRANCISCO(2019)			V		
巴威 BAVI(2020)				V	V
閃電 ATSANI(2020)	V	V	V		

表 3-5 SSMIS 衛星合成 SI 個案列表。時間由左至右排序分別為 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 24 小時、SI 後 24 小時，此表顯示不同時間點合成的颱風列表。

SI case(16)		-24h	-12h	0h	+12h	+24h
艾維尼	EWINIAR(2012)			75		65
卡努	KHANUN(2012)	85			83	74
潭美	TRAMI(2013)		75		75	80
雅吉	YAGI(2013)	130	105	75		90
北冕	KAMMURI(2014)	150	135	120	120	
彩雲	CHOIWAN(2015)		135	120	130	128
巴威	BAVI(2015)	83			80	
燦樹	CHANTHU(2016)	95	95	95	75	
莫柏	MERBOK(2017)	146				
蘇拉	SAOLA(2017)		100			80
珊珊	SHANSHAN(2018)	70	93	93	83	56
塔巴	TAPAH(2019)	180	114	130	114	140
白鹿	BAILU(2019)	146	146	130	101	80
范斯高	FRANCISCO(2019)			155		
巴威	BAVI(2020)				55	55
閃電	ATSANI(2020)	96	110	74		
使用個案之平均 RMW		118.1	99.8	106.7	91.6	84.8

表 3-6 SSMIS 衛星合成 RI 個案之 RMW(單位為 km)。時間由左至右排序分別為 SI 前 24 小時、SI 前 12 小時、SI 開始、SI 後 24 小時、SI 後 24 小時。

圖

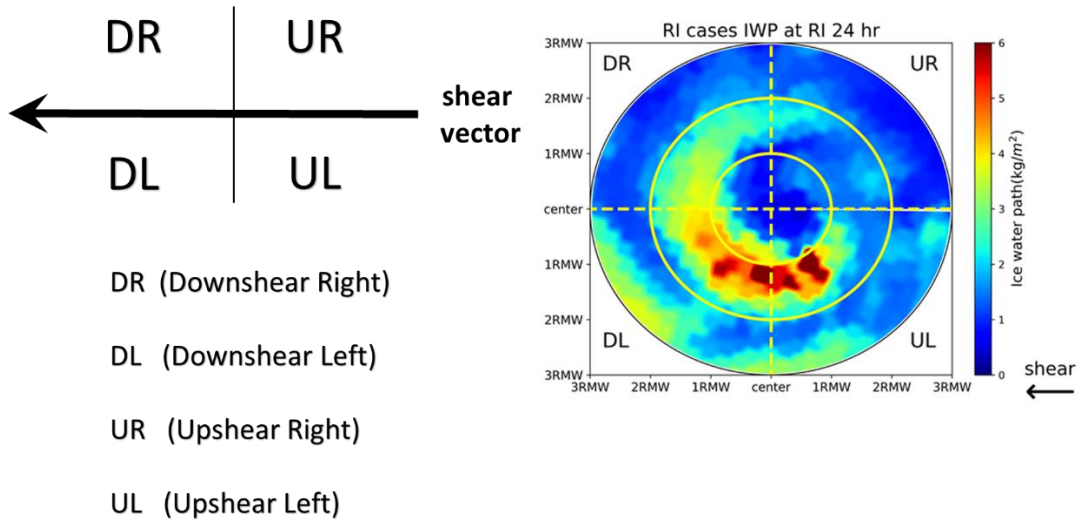


圖 2-1 風切向量座標示意圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓左半側(即向量指向)，為下風切處而在風切向量左側之象限稱為 Down Shear Left (DL)，風切向量右側之象限稱為 Down Shear Right (DR)，而圖中同心圓右半側為上風切處，而在風切向量左側之象限稱為 Up Shear Left (UL)，風切向量右側之象限稱為 Up Shear Right (UR)。同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。

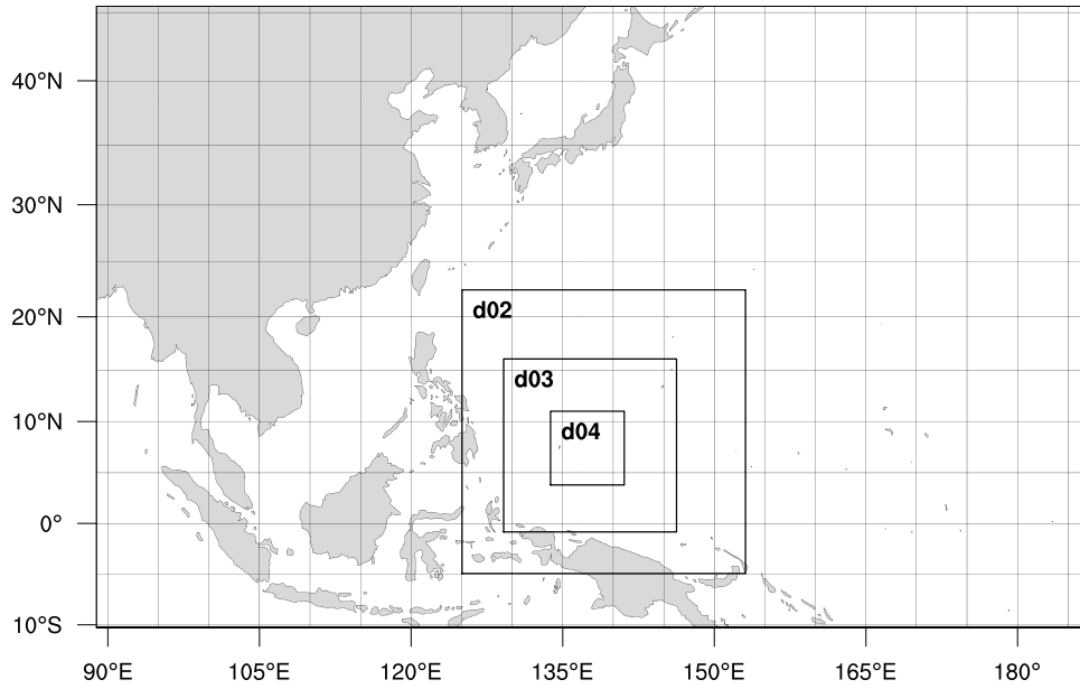


圖 2-2 RI 颱風個案蘇力基巢狀網域設計

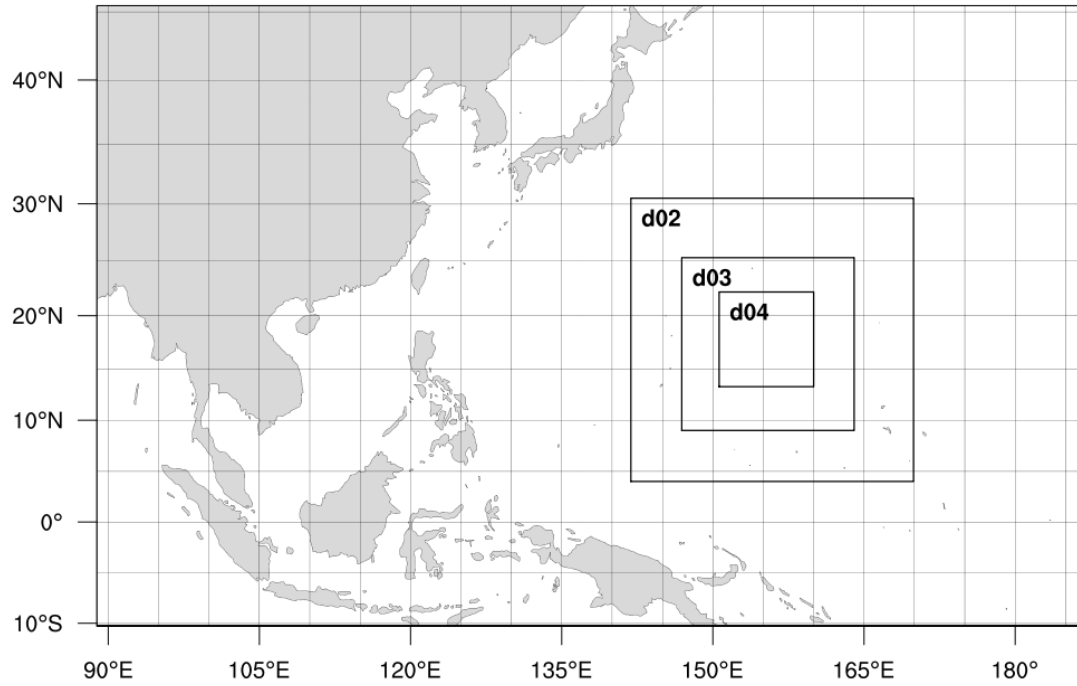


圖 2-3 SI 颱風個案珊珊巢狀網域設計

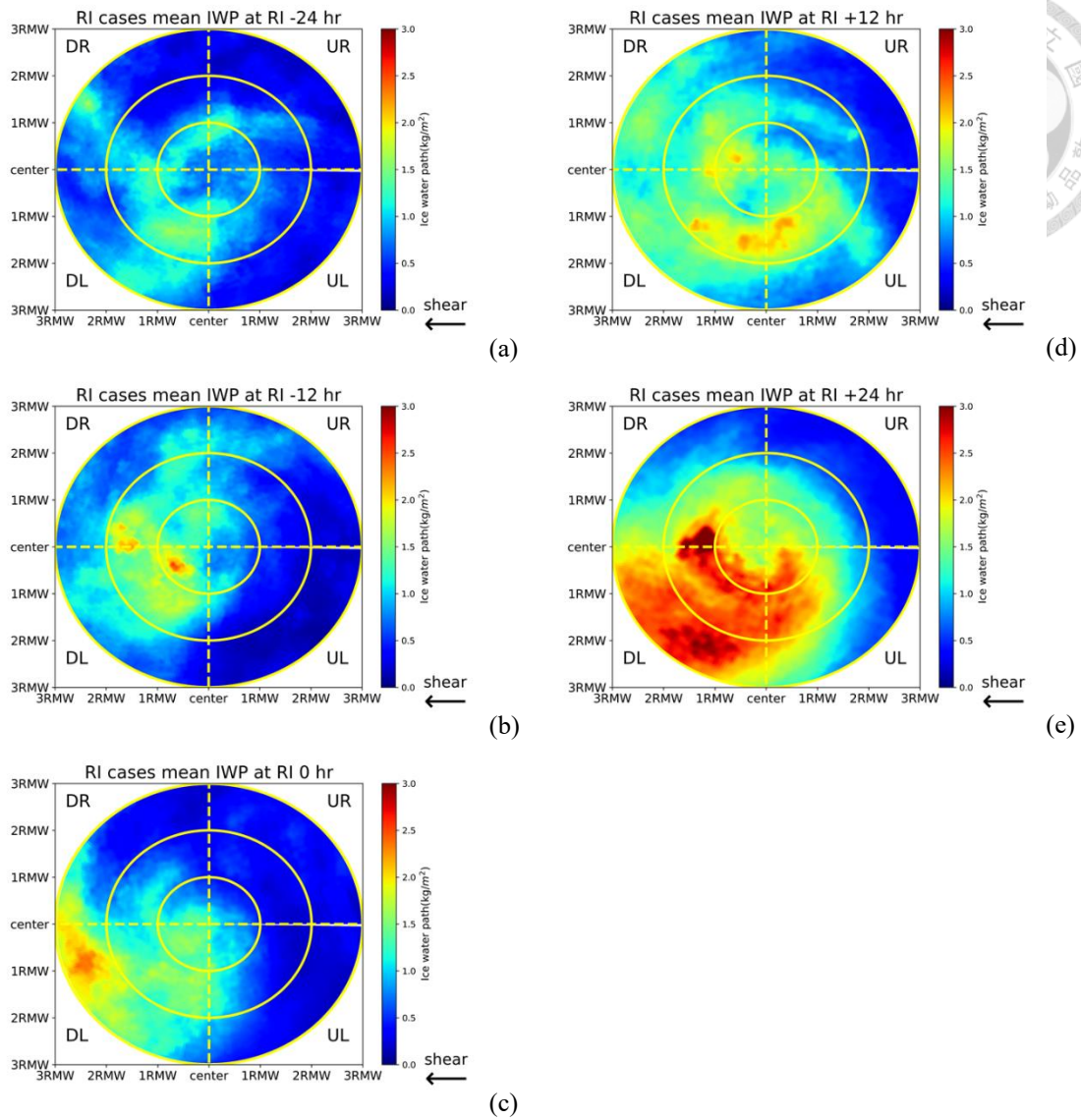


圖 3-1 SSMIS 衛星 RI 個案 IWP 合成分析圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

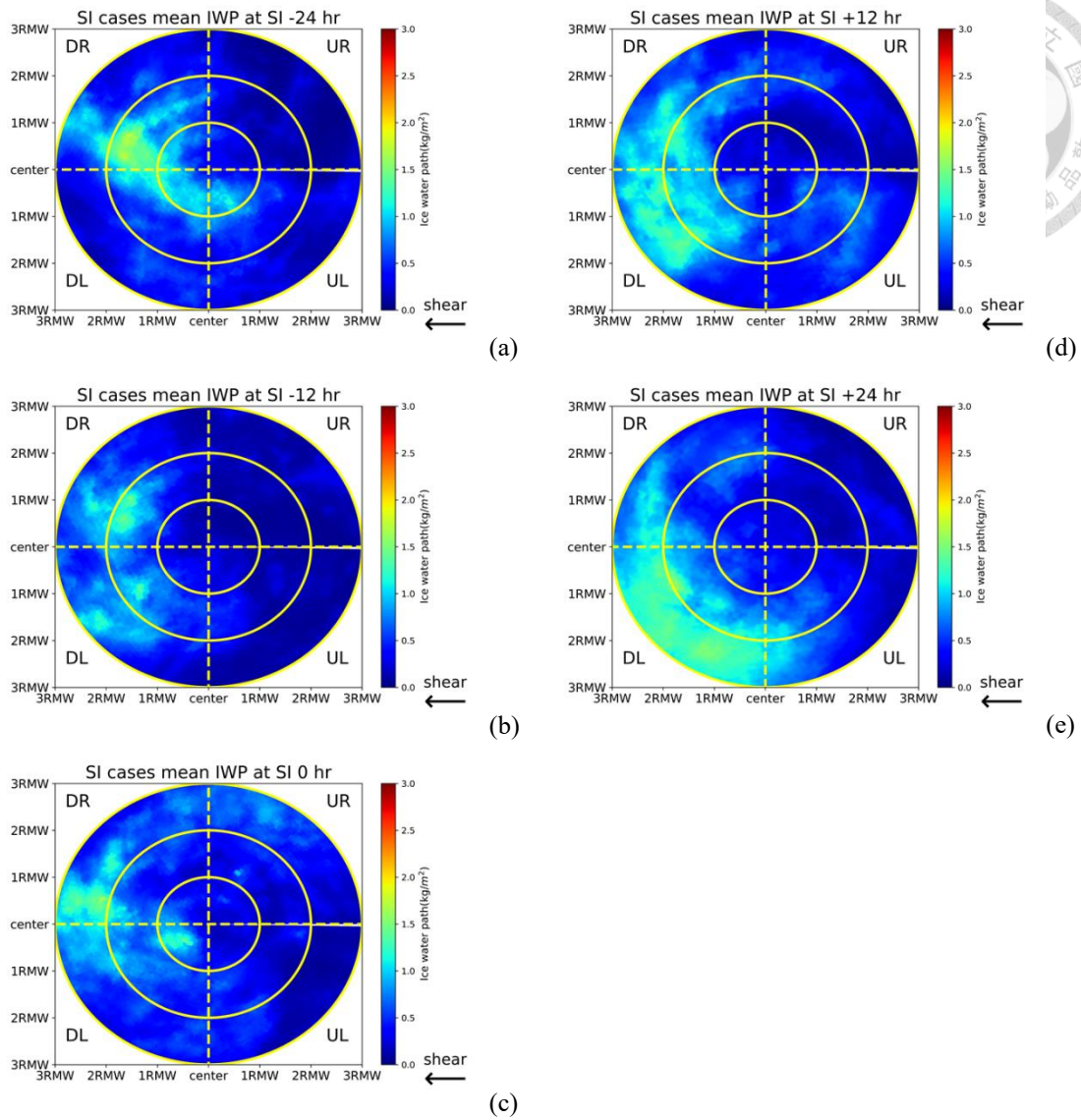


圖 3-2 SSMIS 衛星 SI 個案 IWP 合成分析圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

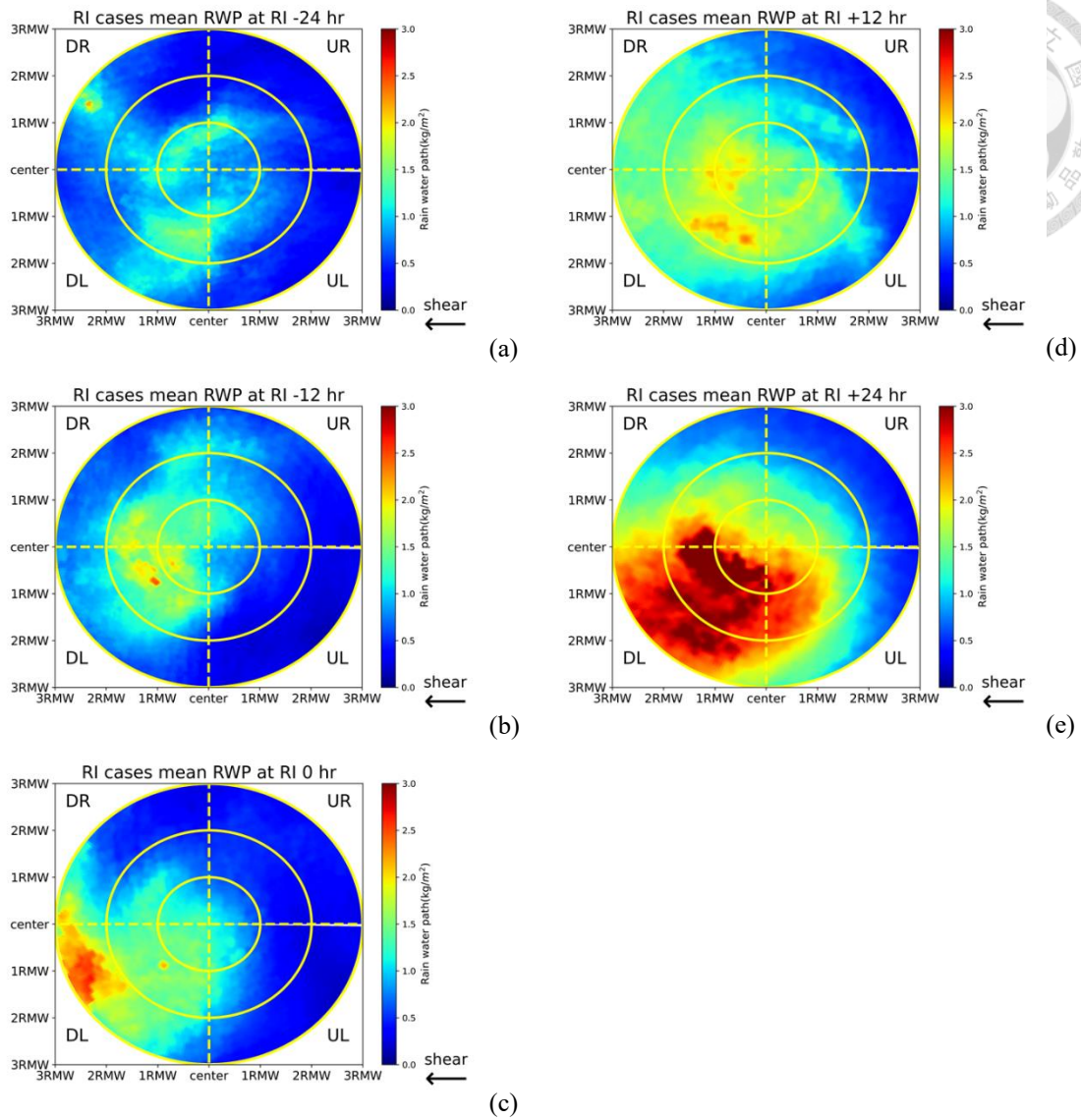


圖 3-3 SSMIS 衛星 RI 個案 RWP 合成分析圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

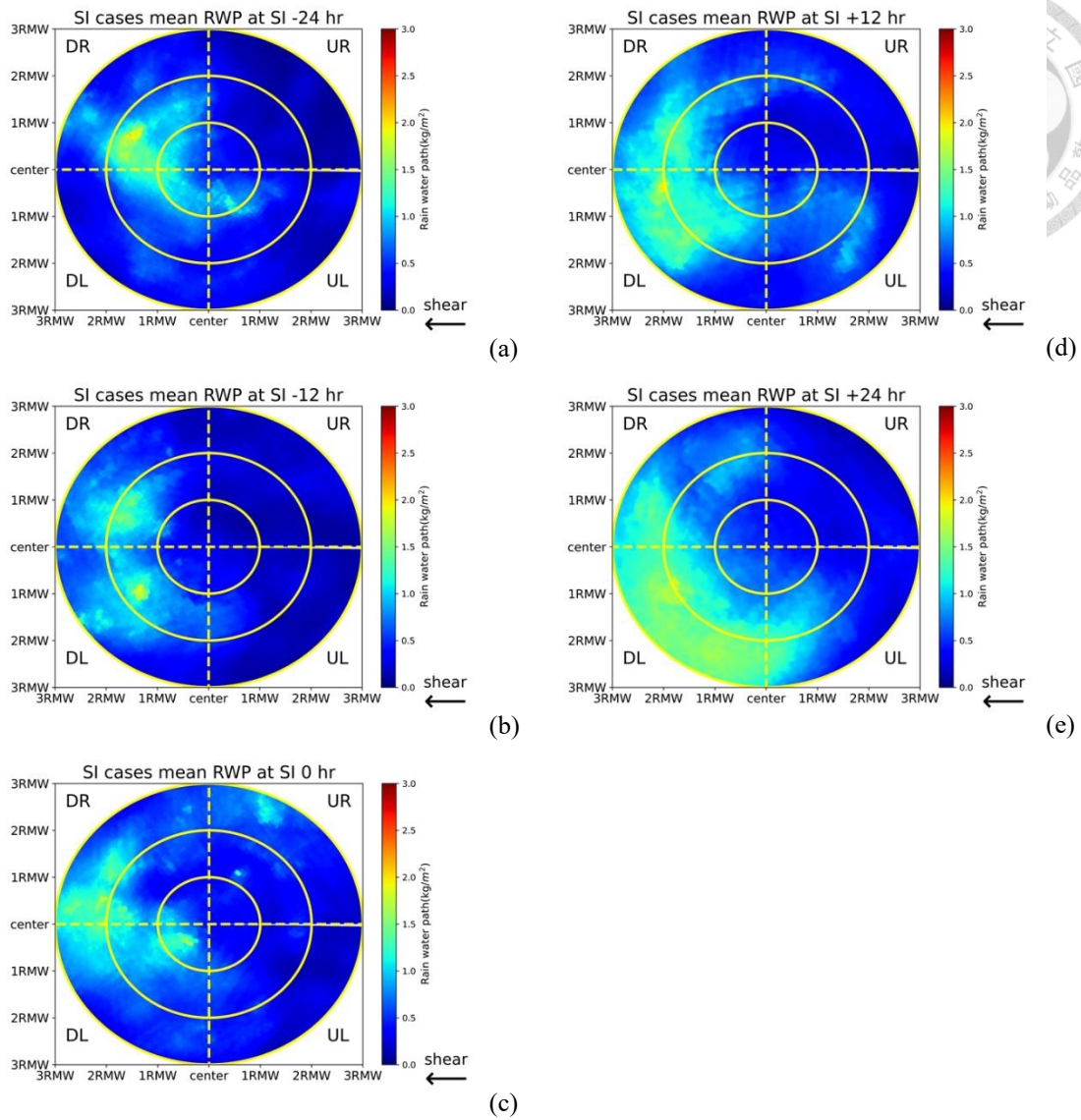


圖 3-4 SSMIS 衛星 SI 個案 RWP 合成分析圖。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

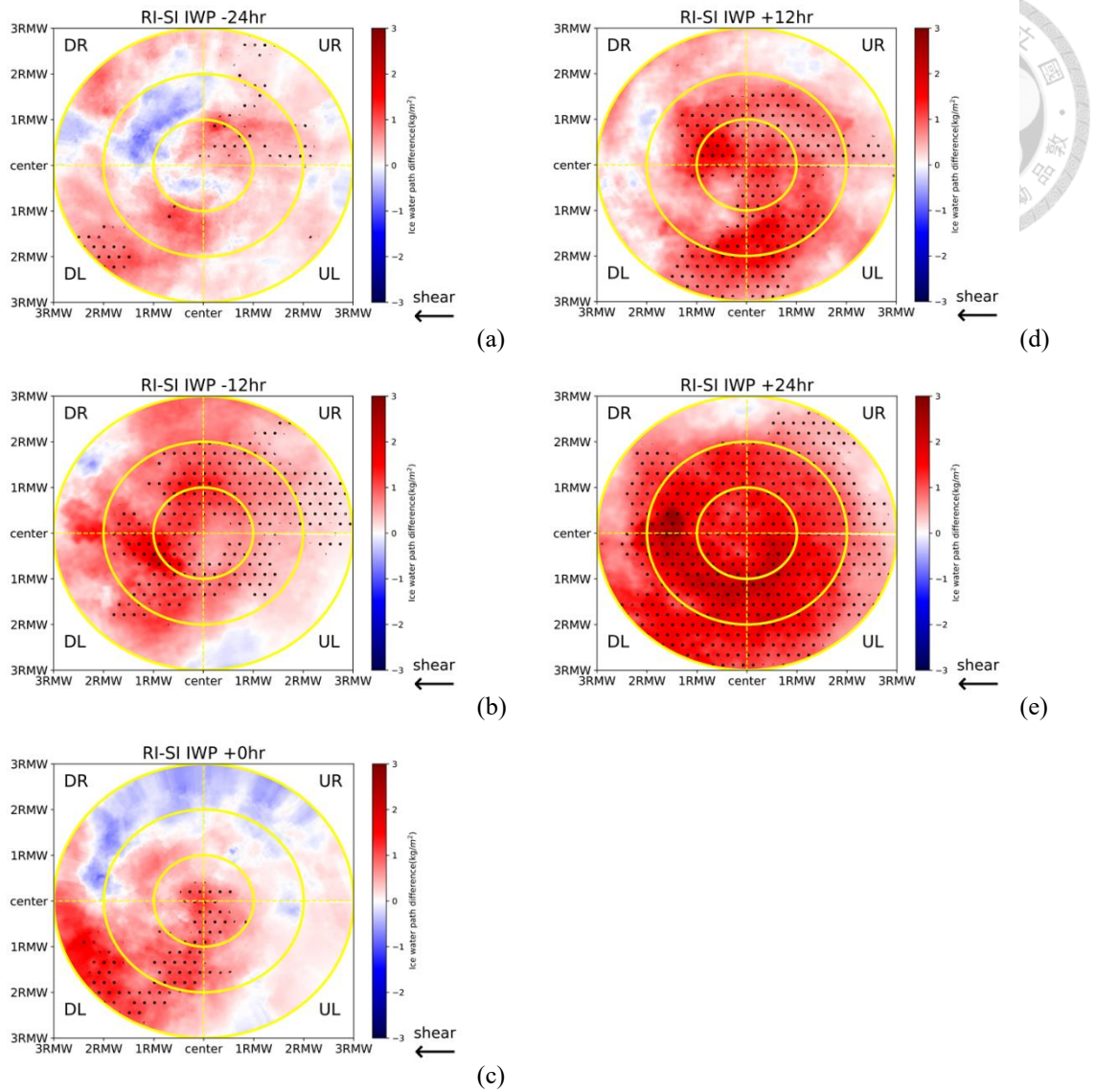


圖 3-5 SSMIS 衛星 RI 與 SI 個案分別經合成分析後 IWP 差值。色塊顏色表 RI-SI 後之差值。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。黑點表該處經統計檢定後，在 95%信心水準下具有統計上差異性。(a)增強前 24 小時、(b)增強前 12 小時、(c)增強開始、(d)增強後 12 小時、(e)增強後 24 小時。

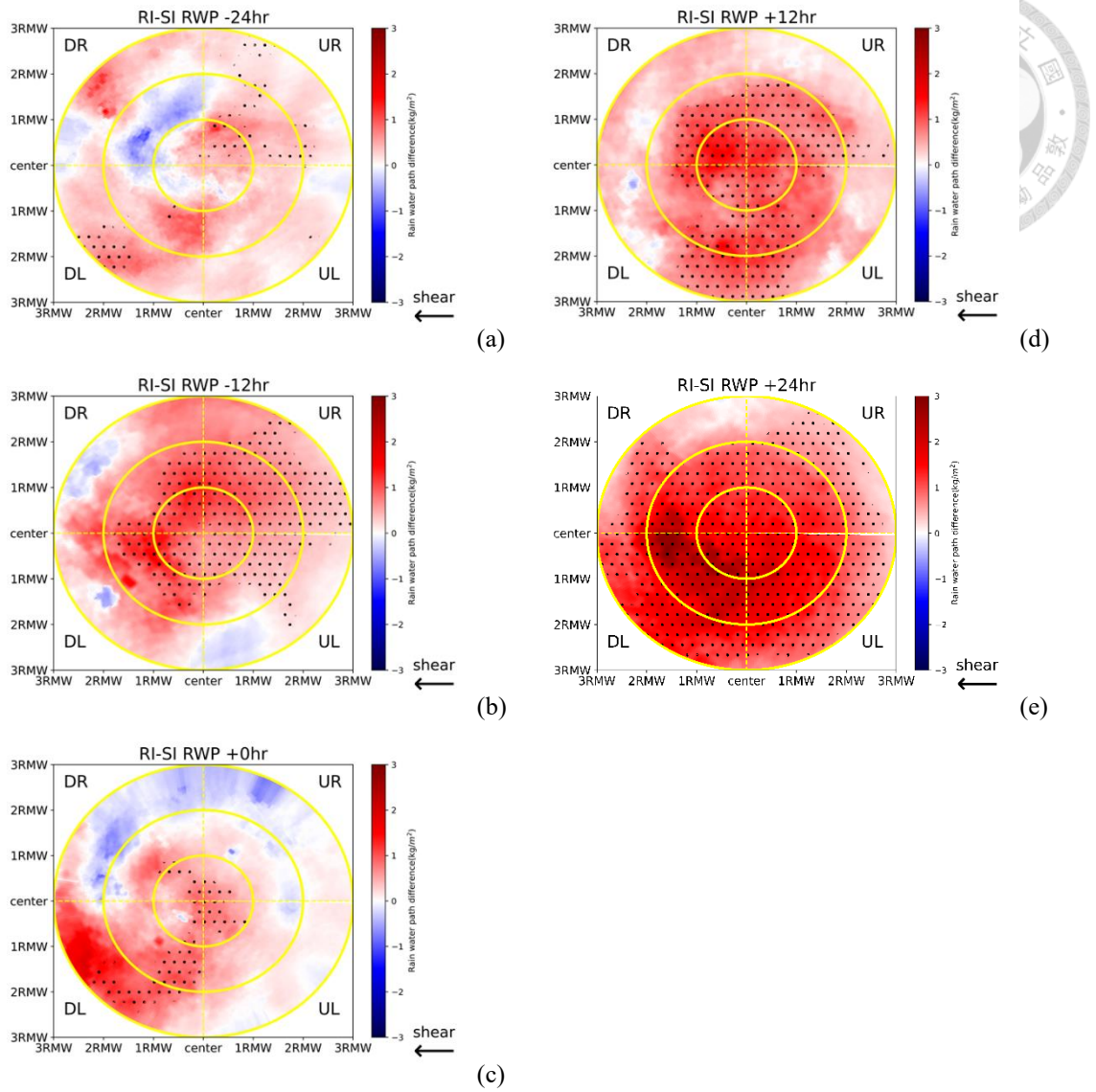
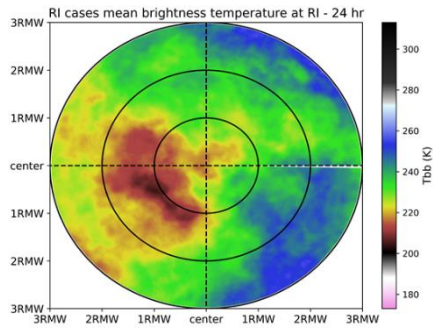
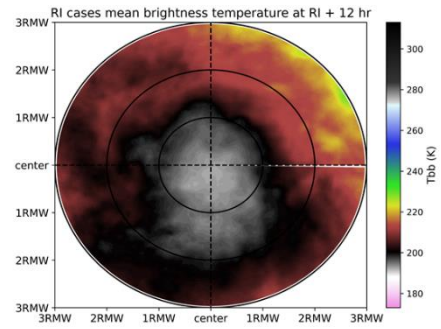


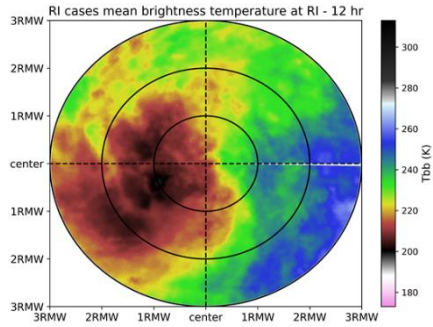
圖 3-6 SSMIS 衛星 RI 與 SI 個案分別經合成分析後 RWP 差值。色塊顏色表 RI-SI 後之差值。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。黑點表該處經統計檢定後，在 95%信心水準下具有統計上差異性。(a)增強前 24 小時、(b)增強前 12 小時、(c)增強開始、(d)增強後 12 小時、(e)增強後 24 小時。



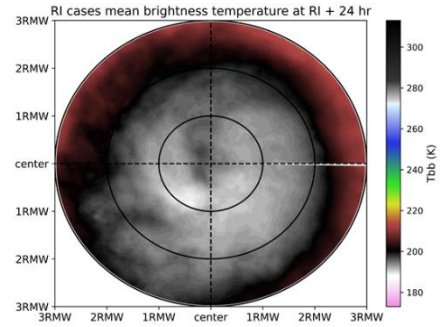
(a)



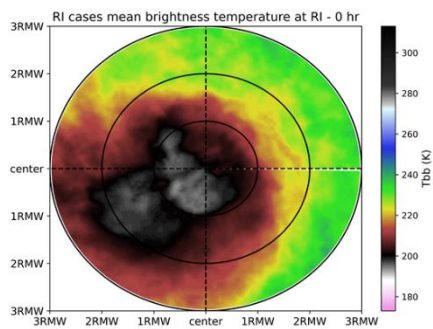
(d)



(b)

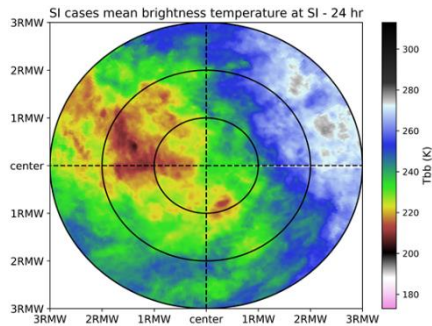


(e)

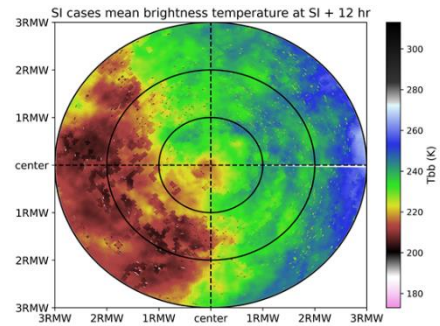


(c)

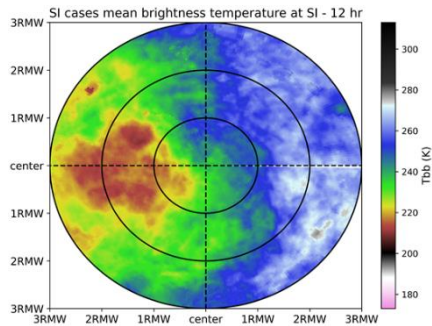
圖 3-7 RI 個案紅外波段亮溫合成分析。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。



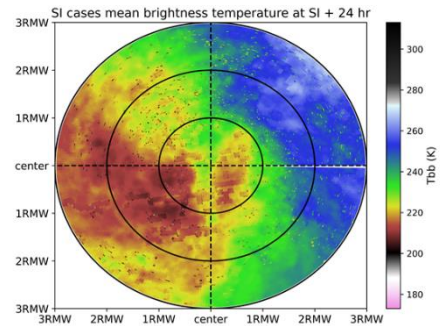
(a)



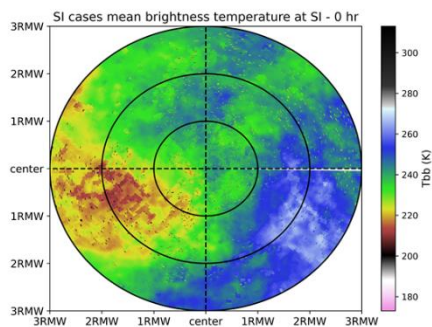
(d)



(b)



(e)



(c)

圖 3-8 SI 個案紅外波段亮溫合成分析。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

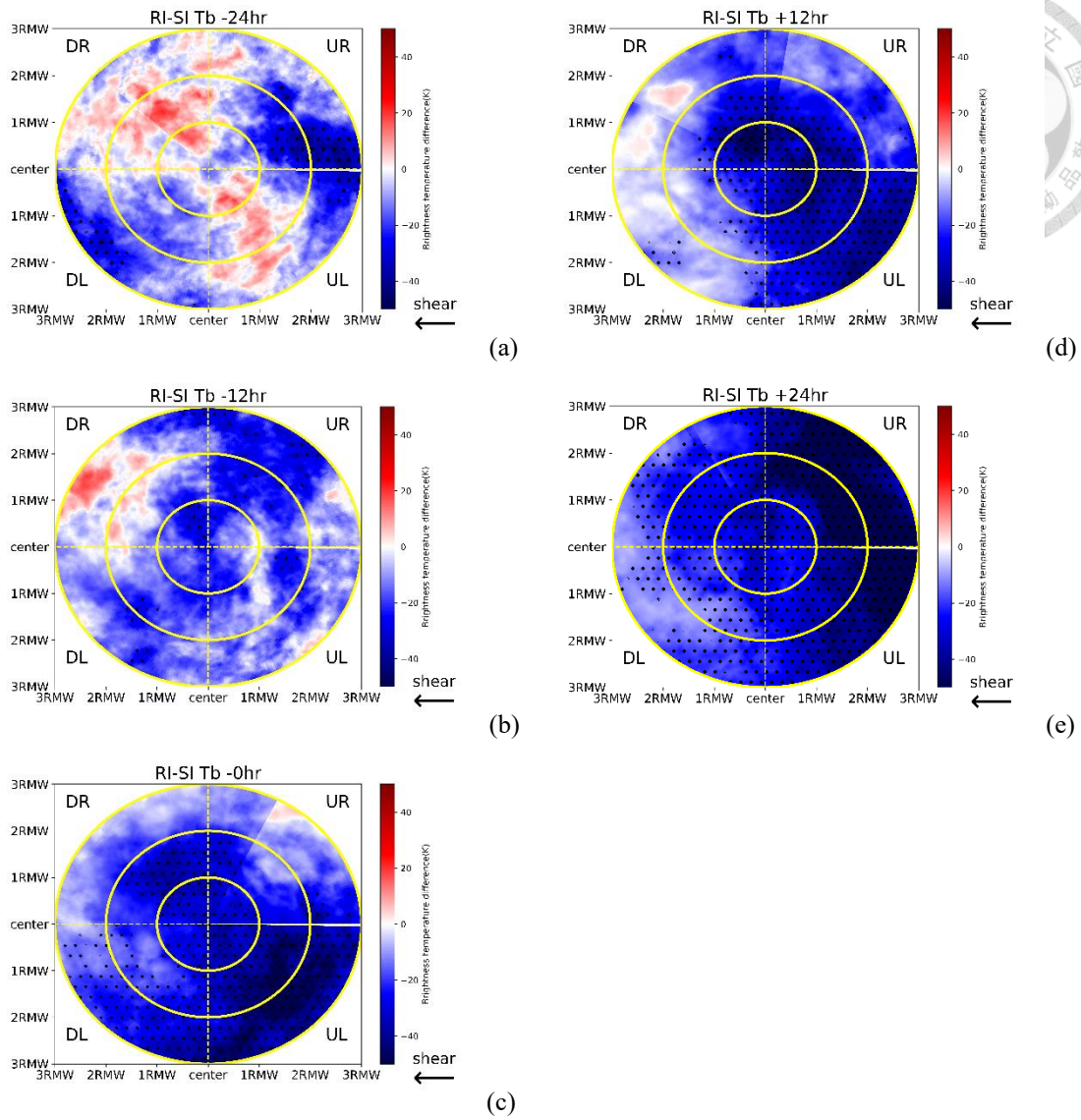


圖 3-9 RI 與 SI 個案分別經合成分析後其紅外波段亮溫差異。色塊顏色表 RI-SI 後之差值。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。黑點表該處經統計檢定後，在 95%信心水準下具有統計上差異性。(a)增強前 24 小時、(b)增強前 12 小時、(c)增強開始、(d)增強後 12 小時、(e)增強後 24 小時。

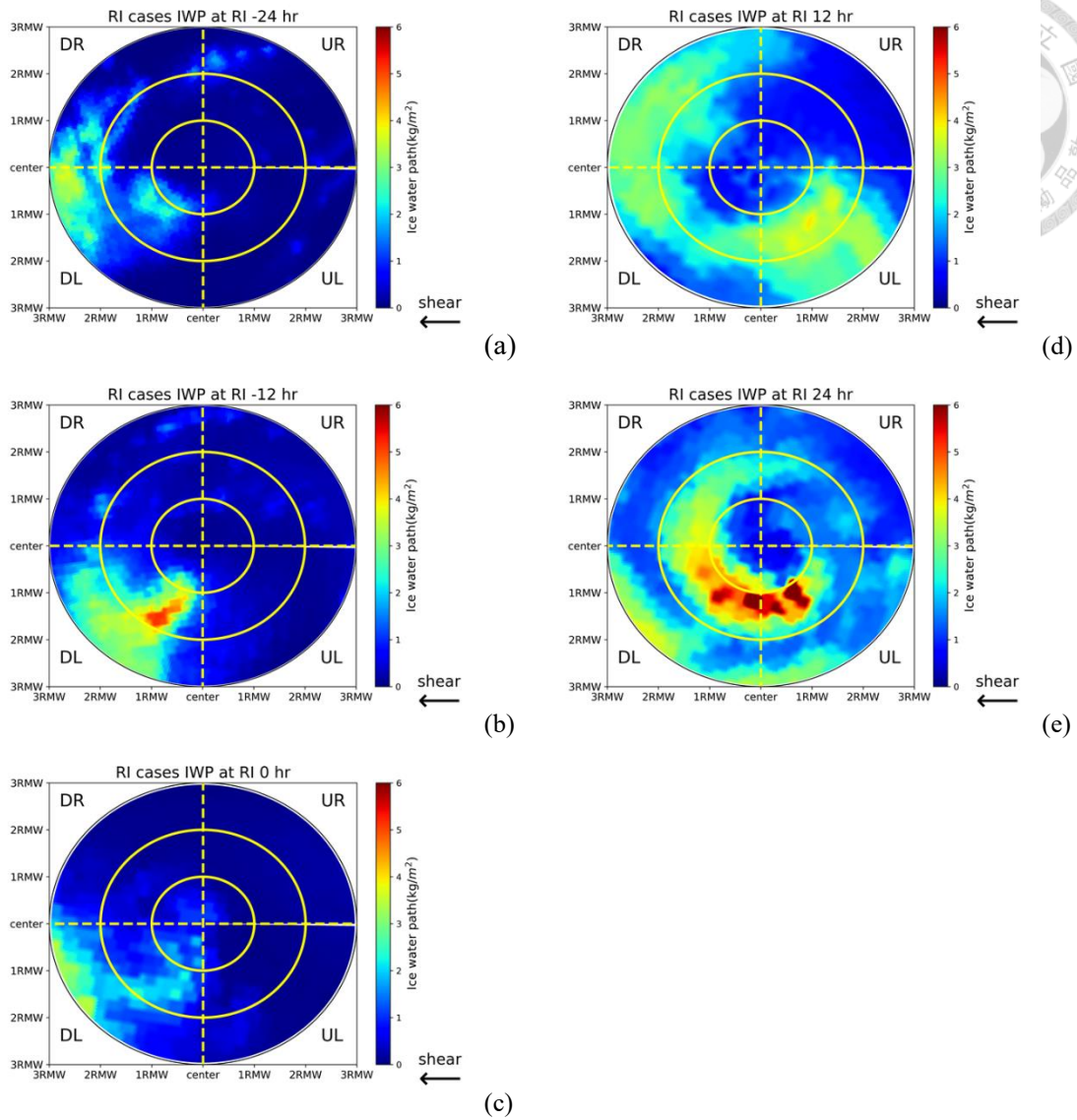


圖 3-10 SSMIS 觀測 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

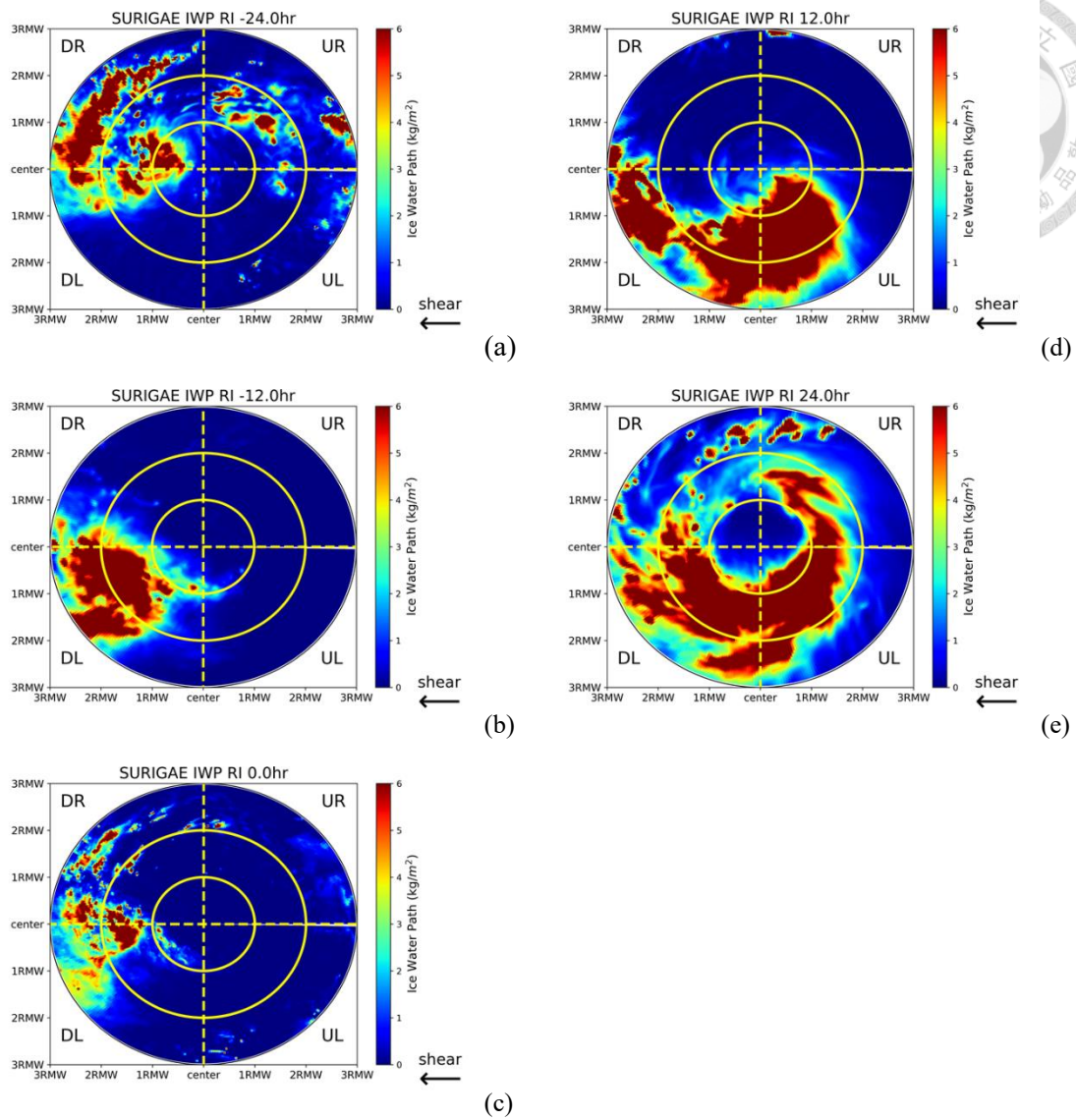


圖 3-11 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

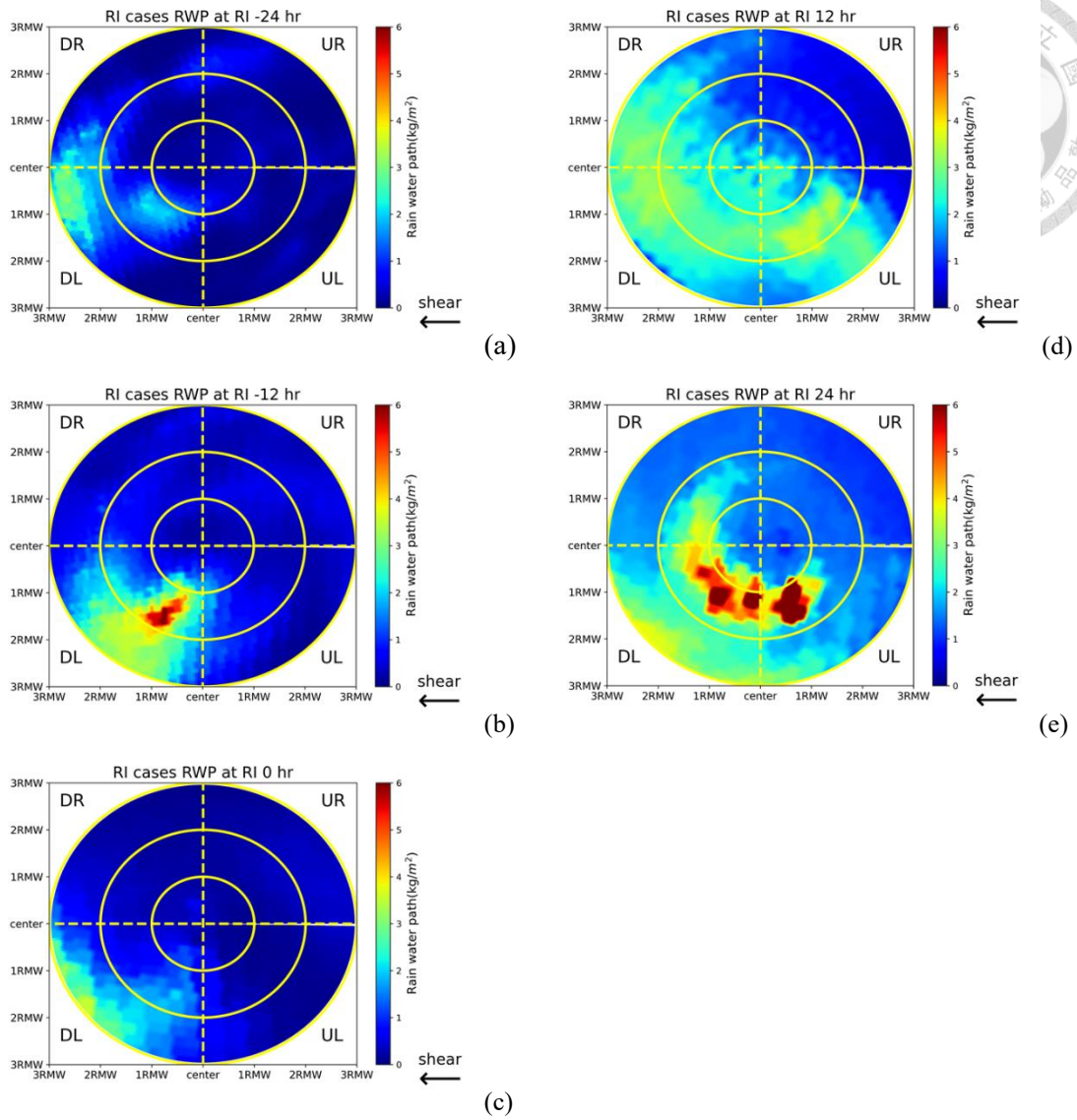


圖 3-12 SSMIS 觀測 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

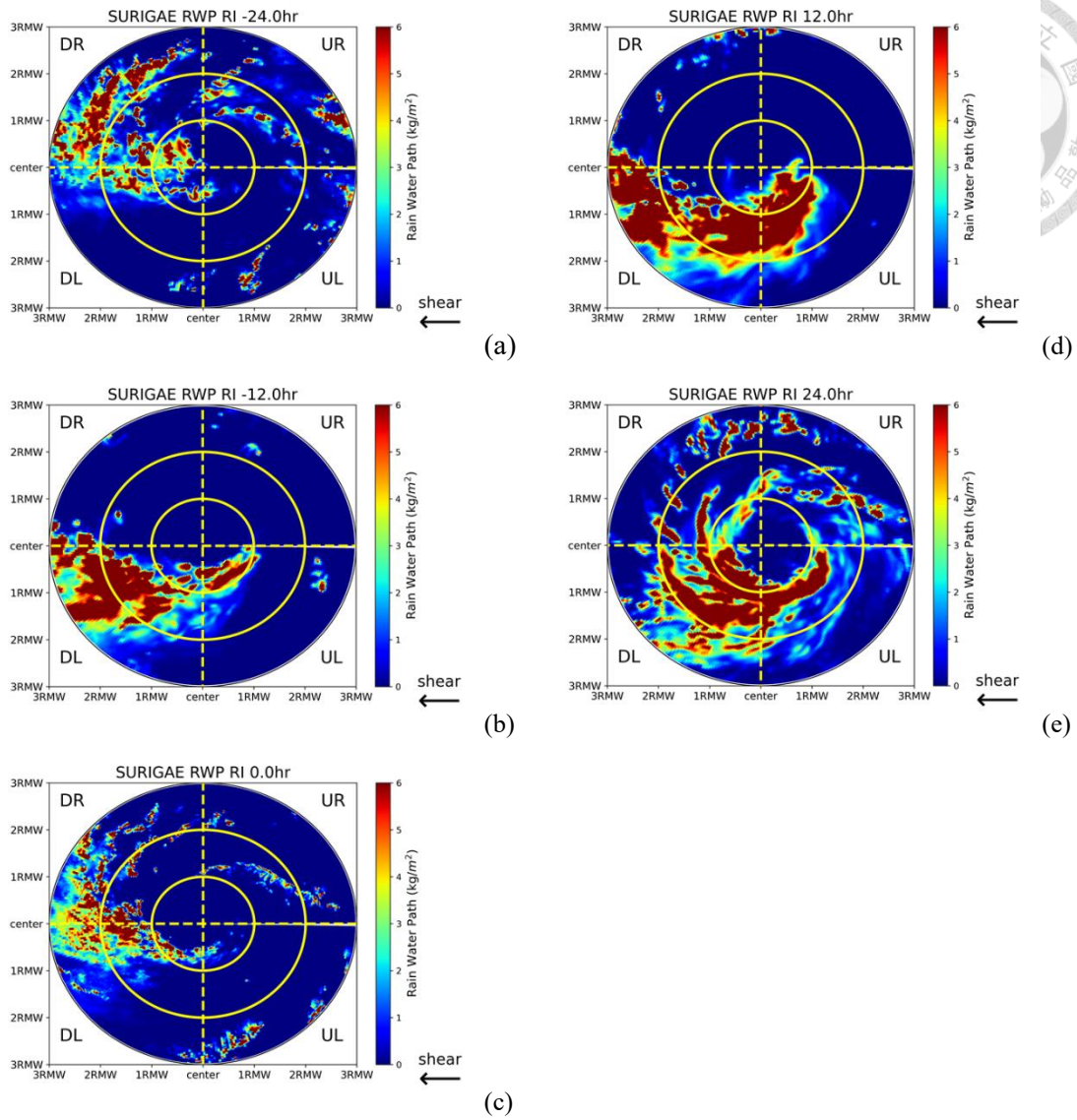


圖 3-13 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

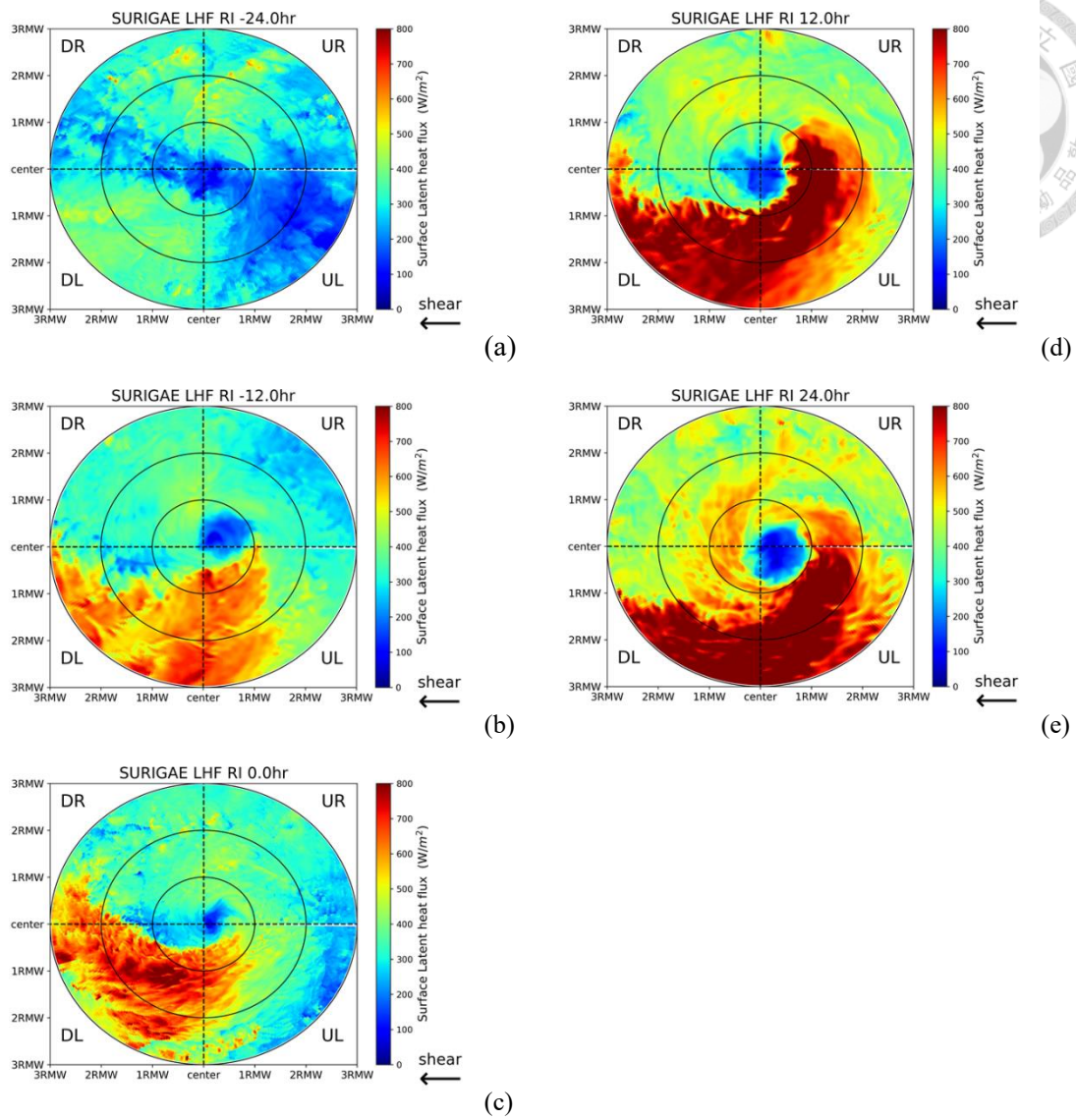


圖 3-14 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之 LHF。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

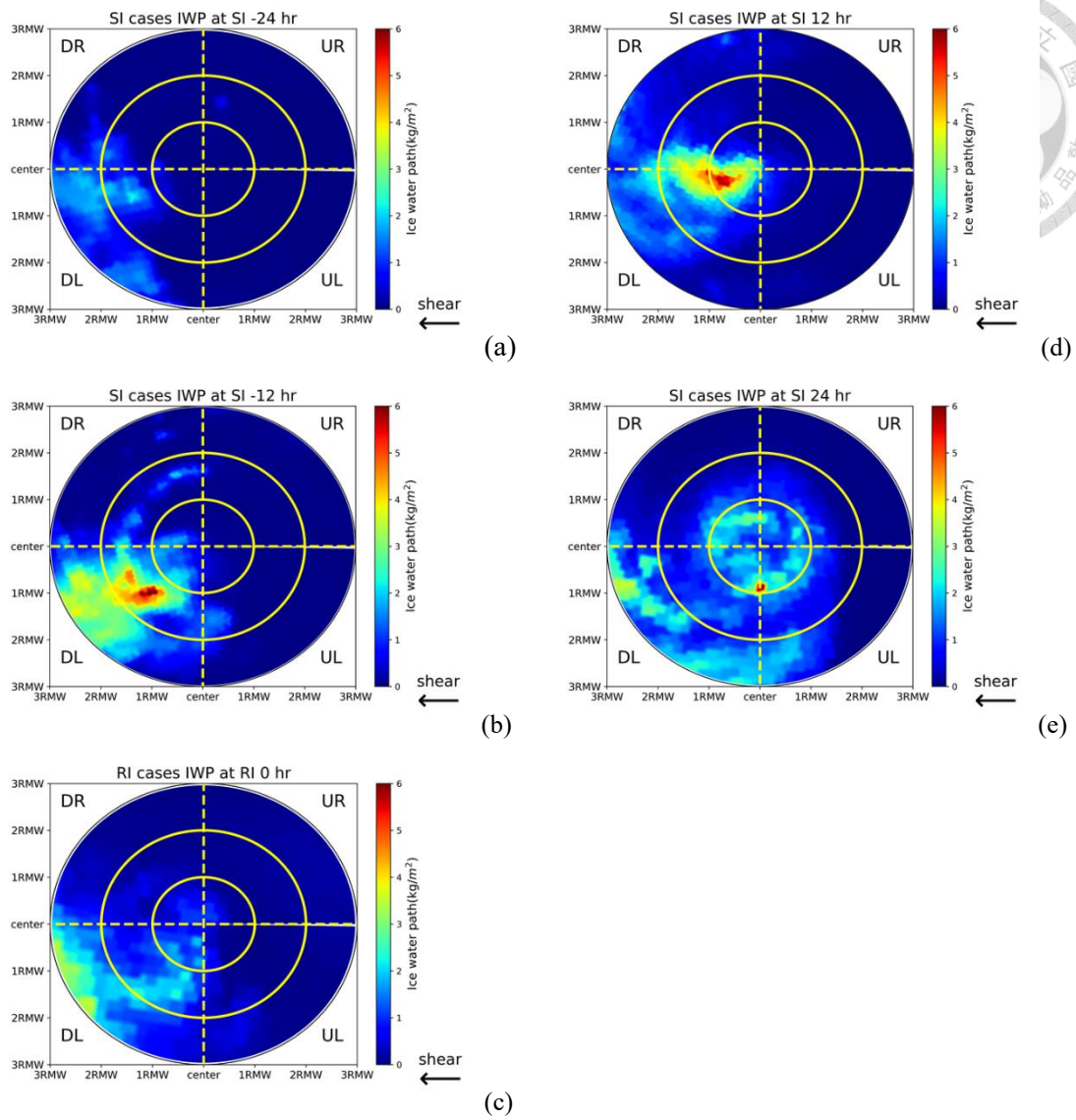


圖 3-15 SSMIS 觀測 SI 個案珊珊颱風(2021)之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

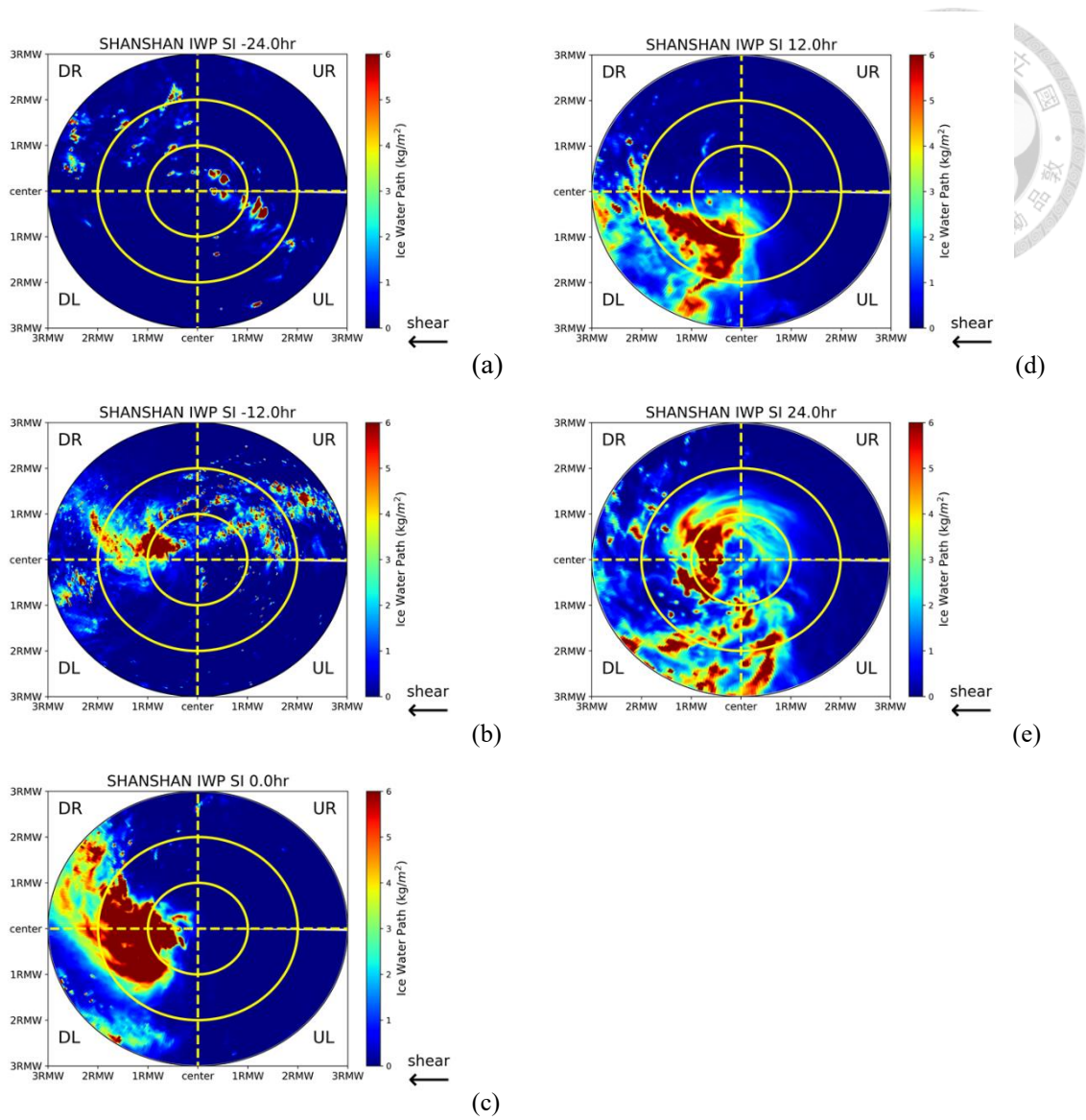


圖 3-16 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

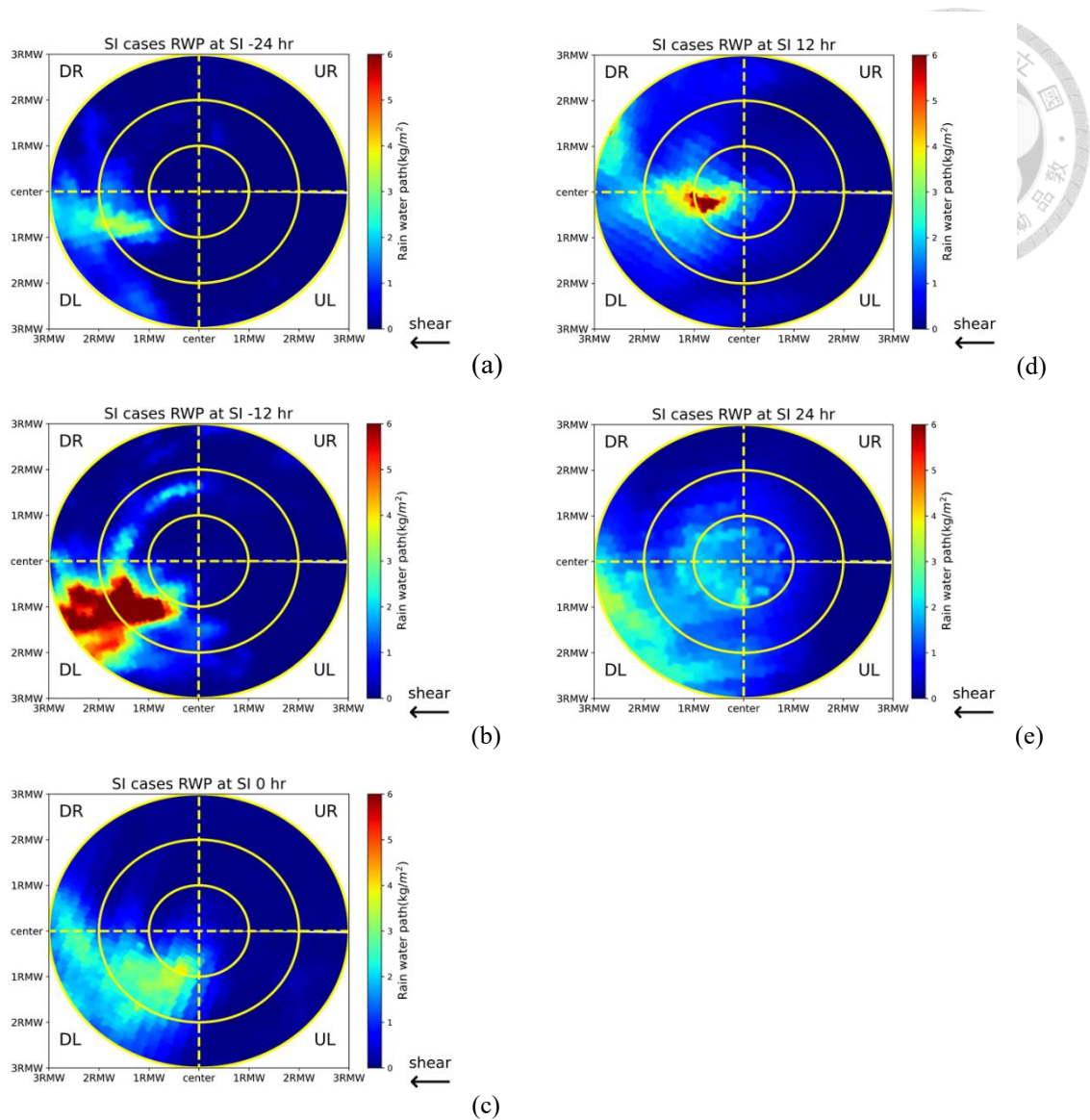


圖 3-17 SSMIS 觀測 SI 個案珊珊颱風(2018)之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

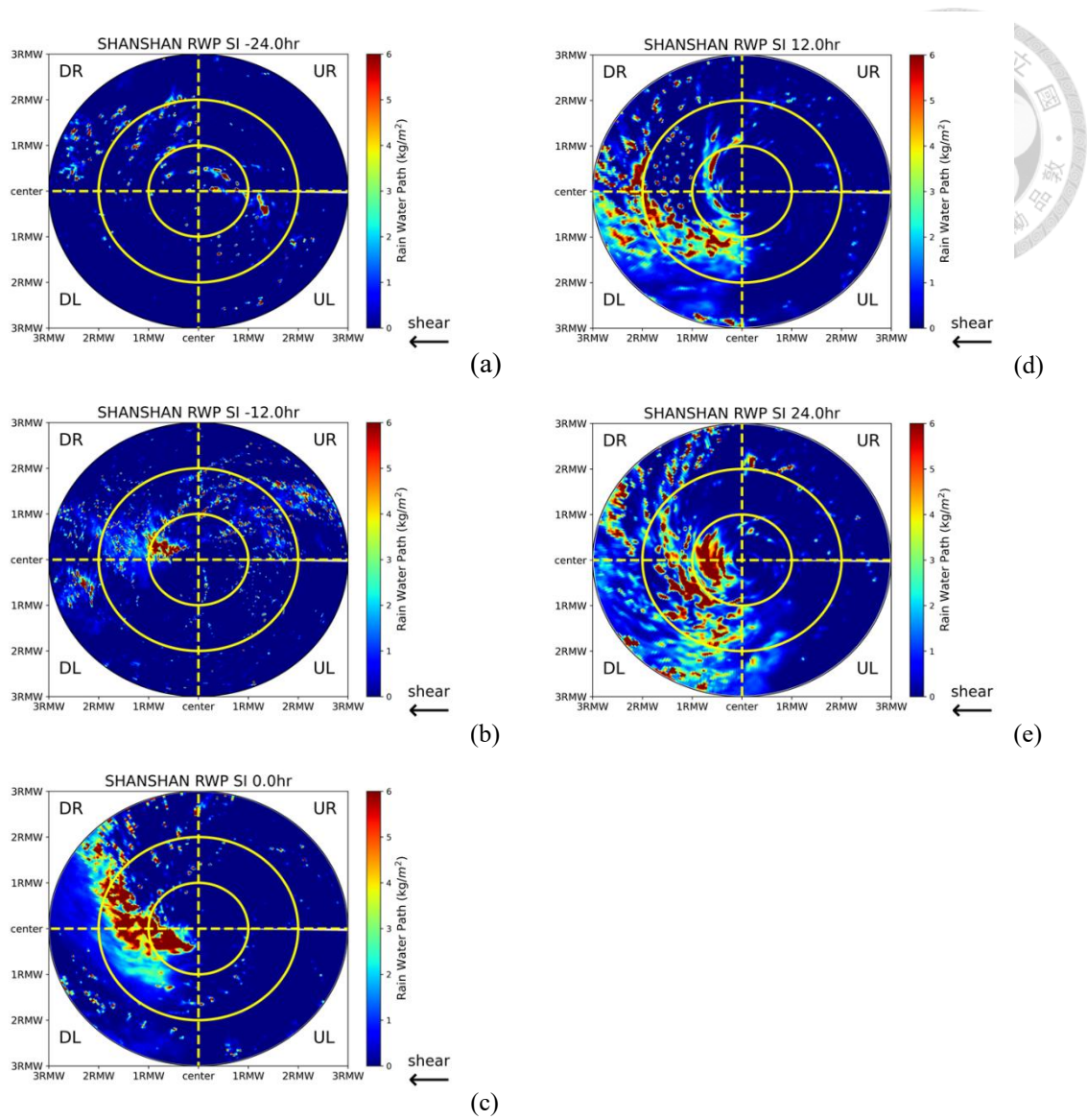


圖 3-18 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

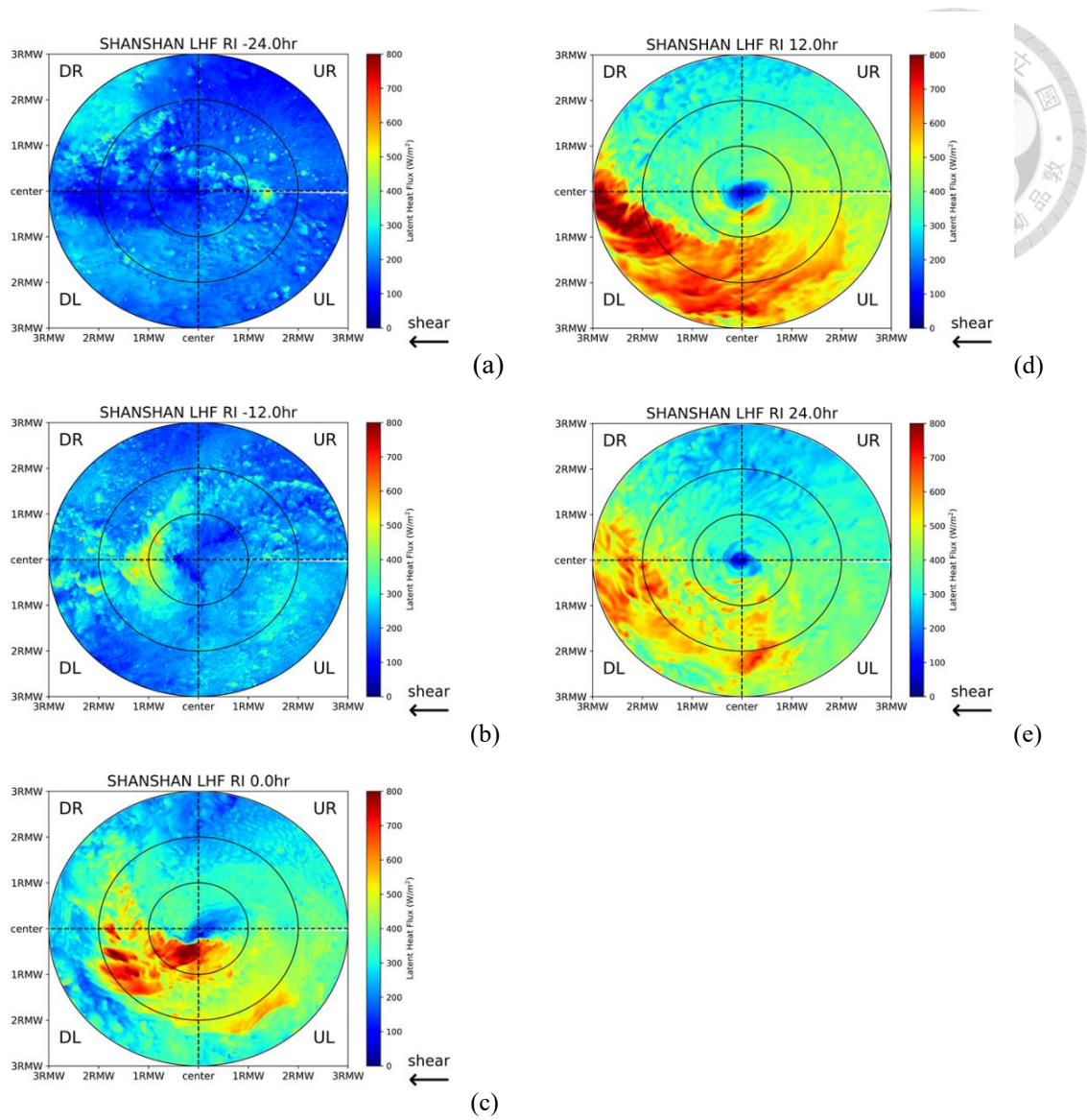


圖 3-19 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之 LHF。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

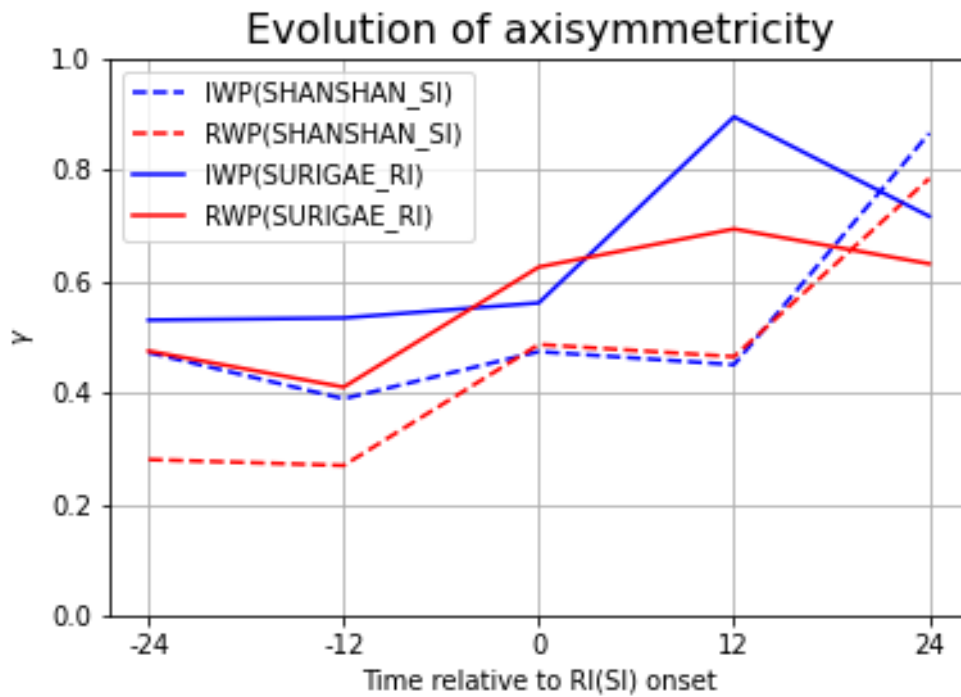


圖 3-20 SSMIS 衛星觀測蘇力基颱風(2021)與珊珊颱風(2018)之 3RMW 內 IWP 及 RWP 軸對稱率時序圖。X 軸表相對於增強(RI/SI)開始當下的時間對應關係，Y 軸表軸對稱率之量值。藍實線表蘇力基颱風 IWP 之軸對稱率，藍虛線表珊珊颱風 IWP 之軸對稱率，紅實線表蘇力基颱風 RWP 之軸對稱率，紅虛線表珊珊颱風 RWP 之軸對稱率。

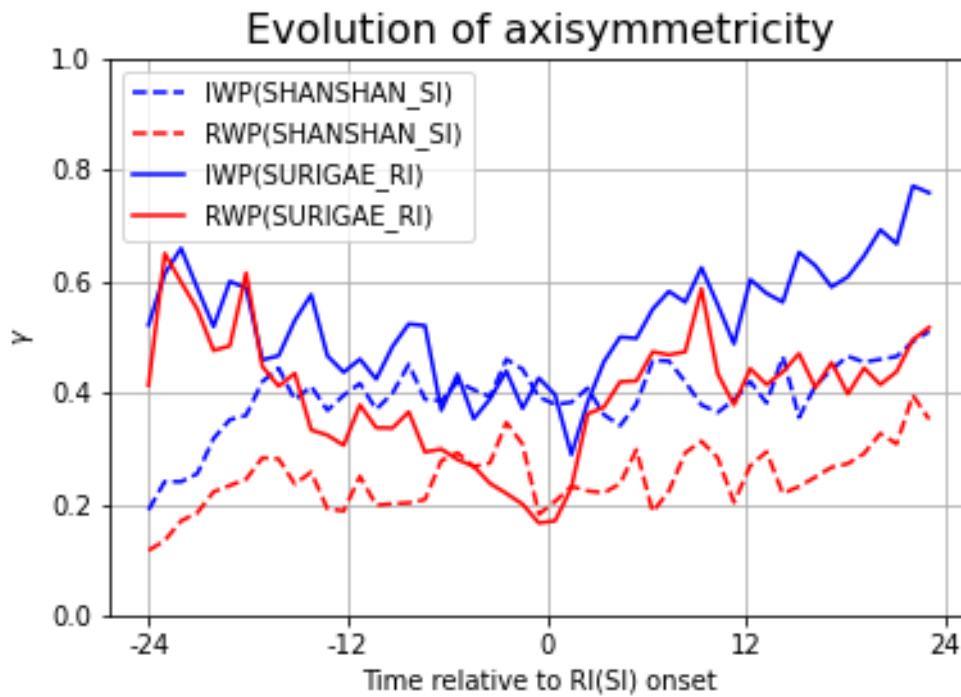


圖 3-21 WRF 模式模擬蘇力基颱風(2021)與珊珊颱風(2018)之 3RMW 內 IWP 及 RWP 軸對稱率
時序圖。X 軸表相對於增強(RI/SI)開始當下對應關係，Y 軸表軸對稱率之量值。藍實線表蘇力基
颱風 IWP 之軸對稱率，藍虛線表珊珊颱風 IWP 之軸對稱率，紅實線表蘇力基颱風 RWP 之軸對
稱率，紅虛線表珊珊颱風 RWP 之軸對稱率。

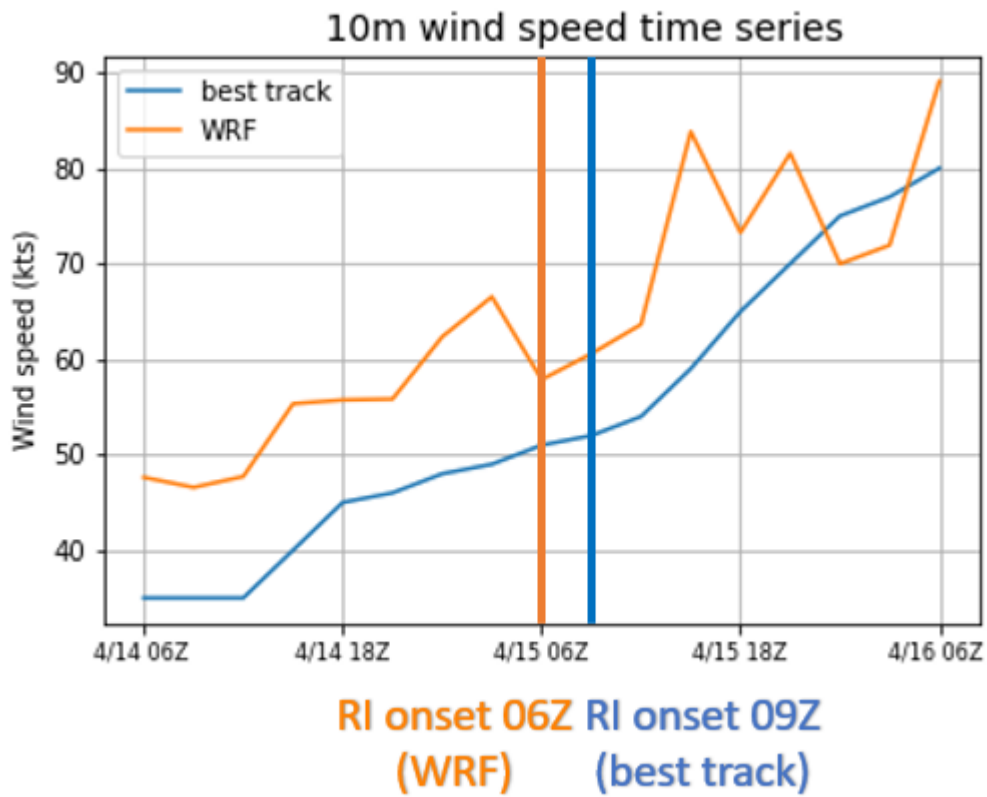
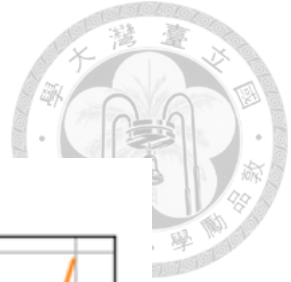


圖 3-22 蘇力基颱風(2021)10 米風極大值時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 10 米風之量值。橘線表 WRF 模擬之颱風 10 米風極大值，藍線表 best track 提供之颱風 10 米風極值。橘粗垂直線表 WRF 模擬中颱風 RI 開始的時間點，藍粗垂直線表 best track 中颱風 RI 開始的時間點。

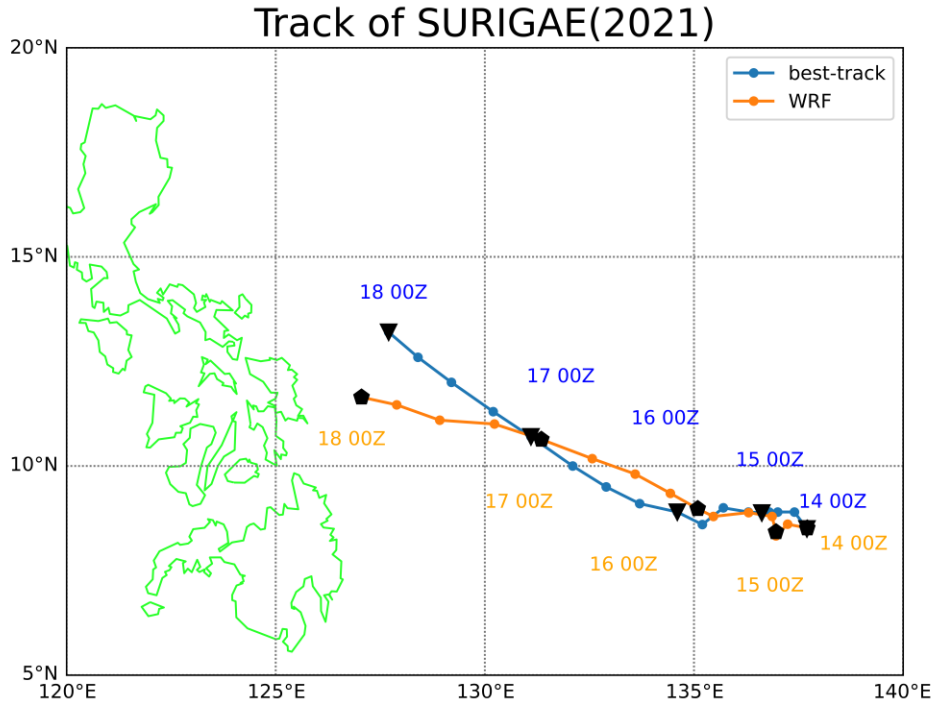


圖 3-23 蘇力基颱風(2021)路徑圖。橘線表 WRF 模擬之路徑，藍線表 best track 提供之颱風路徑，倒三角形表 best track 每日 00Z 之中心定位，正五邊形表 WRF 模擬中每日 00Z 之中心定位。

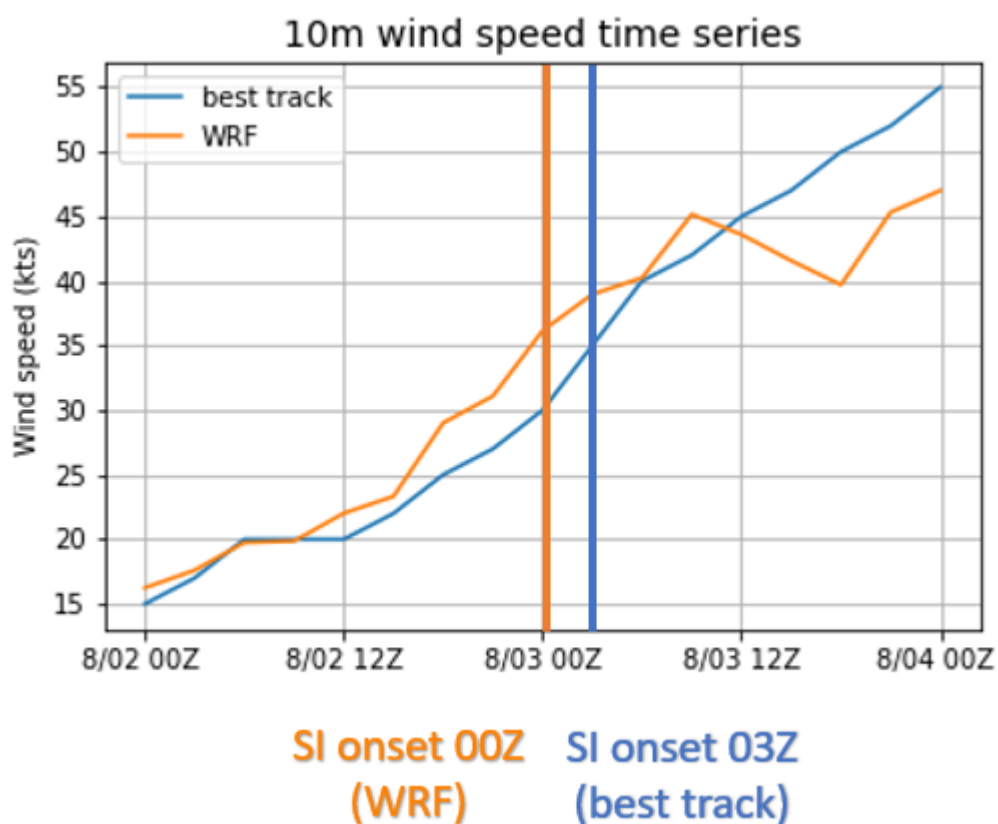


圖 3-24 珊珊颱風(2018)10 米風極大值時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 10 米風之量值。橘線表 WRF 模擬之颱風 10 米風極大值，藍線表 best track 提供之颱風 10 米風極值。橘粗垂直線表 WRF 模擬中颱風 SI 開始的時間點，藍粗垂直線表 best track 中颱風 SI 開始的時間點。

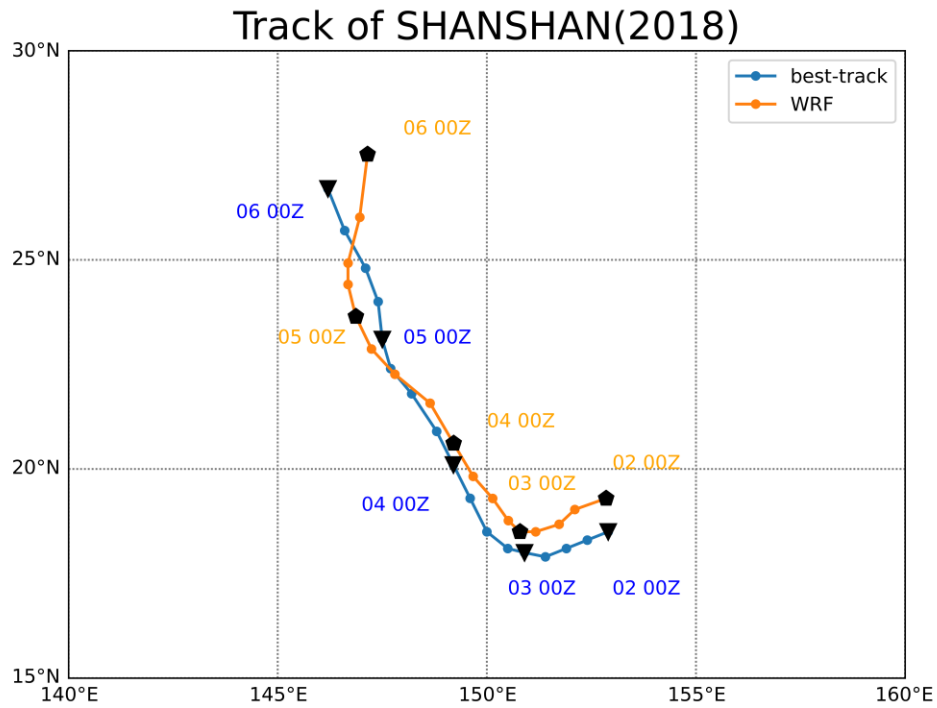


圖 3-25 珊珊颱風(2018)路徑圖。橘線表 WRF 模擬之路徑，藍線表 best track 提供之颱風路徑，倒三角形表 best track 每日 00Z 之中心定位，正五邊形表 WRF 模擬中每日 00Z 之中心定位。

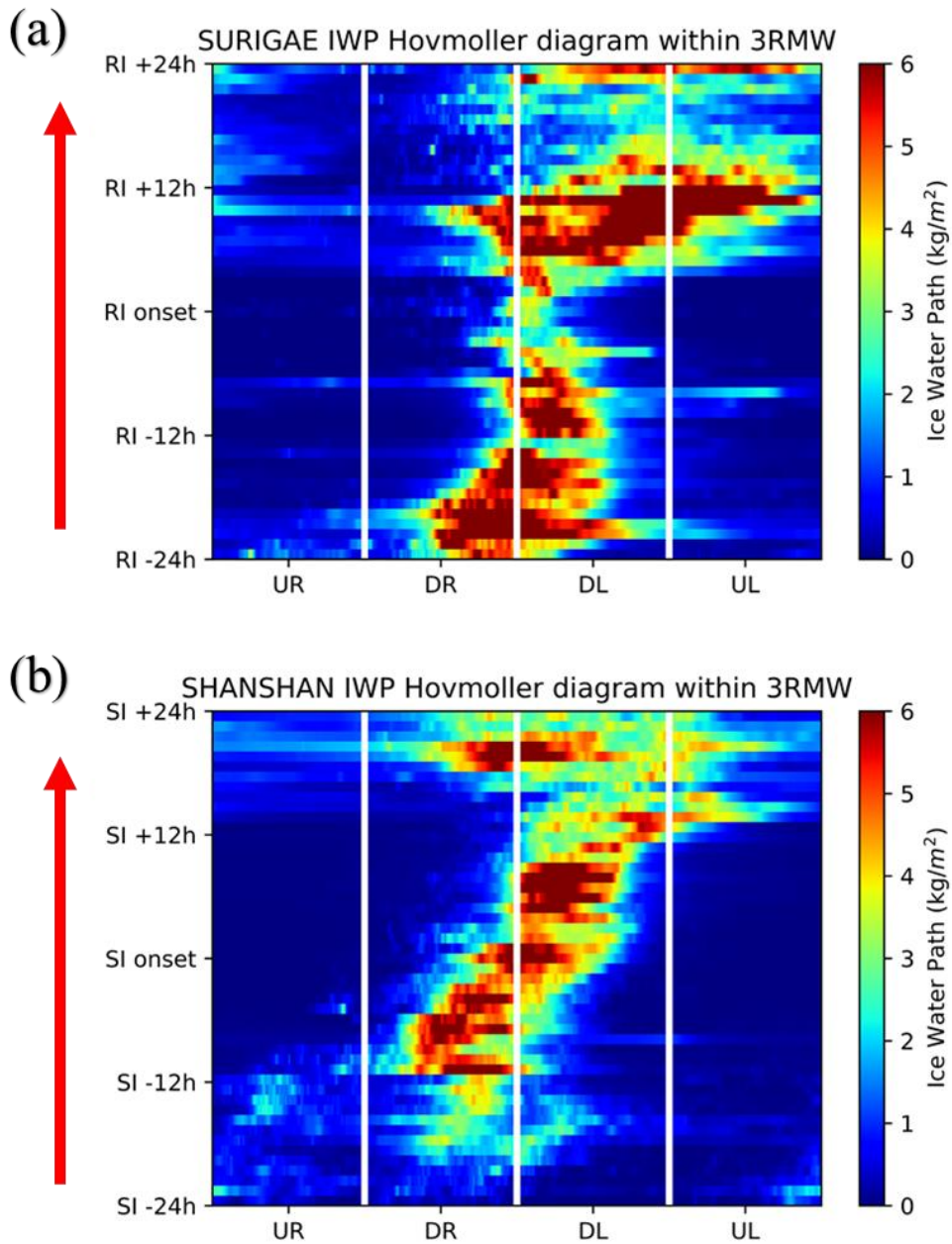


圖 3-26 IWP 哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均 IWP 量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)蘇力基颱風、(b)珊珊颱風。

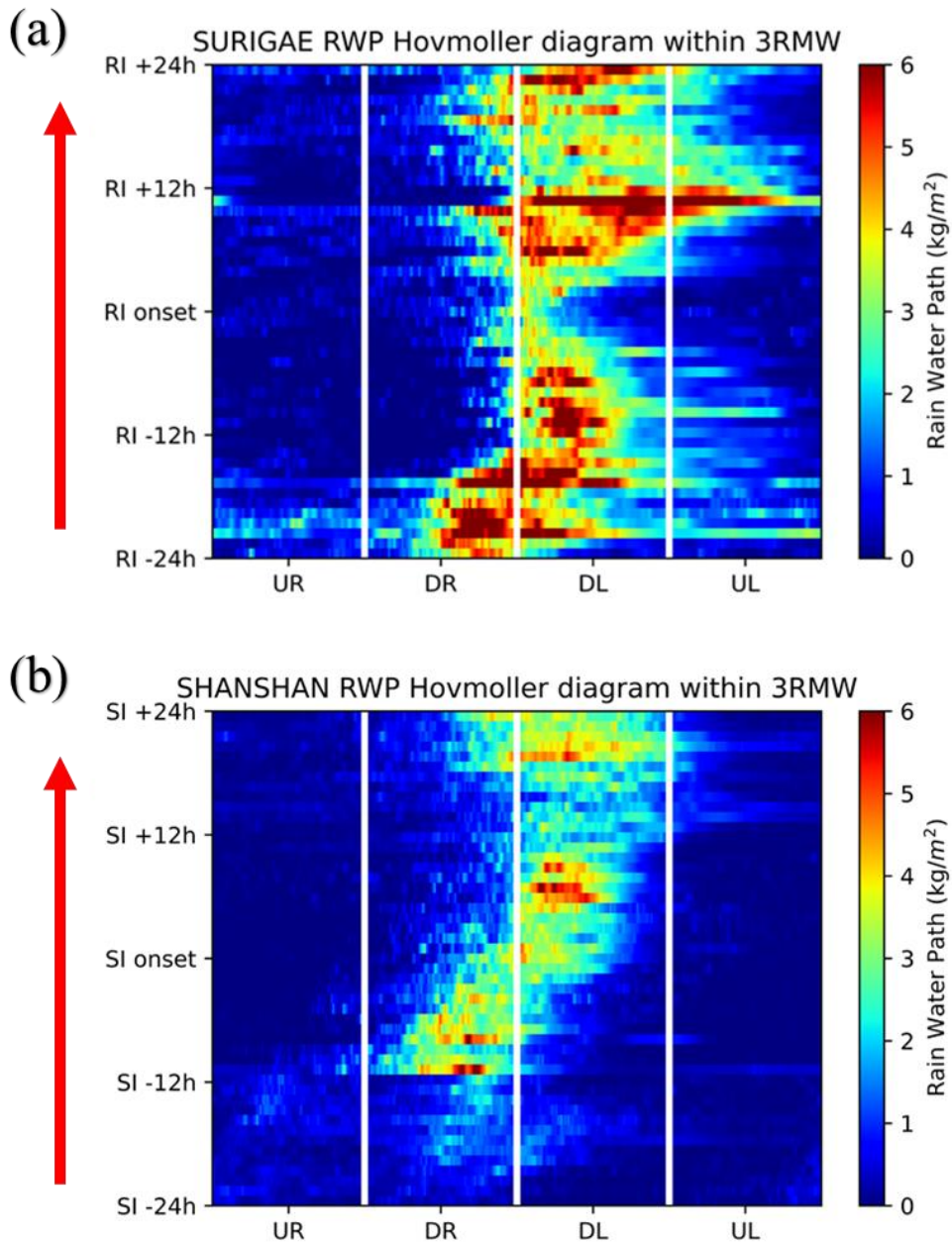


圖 3-27 RWP 哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均 RWP 量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)蘇力基颱風、(b)珊珊颱風。

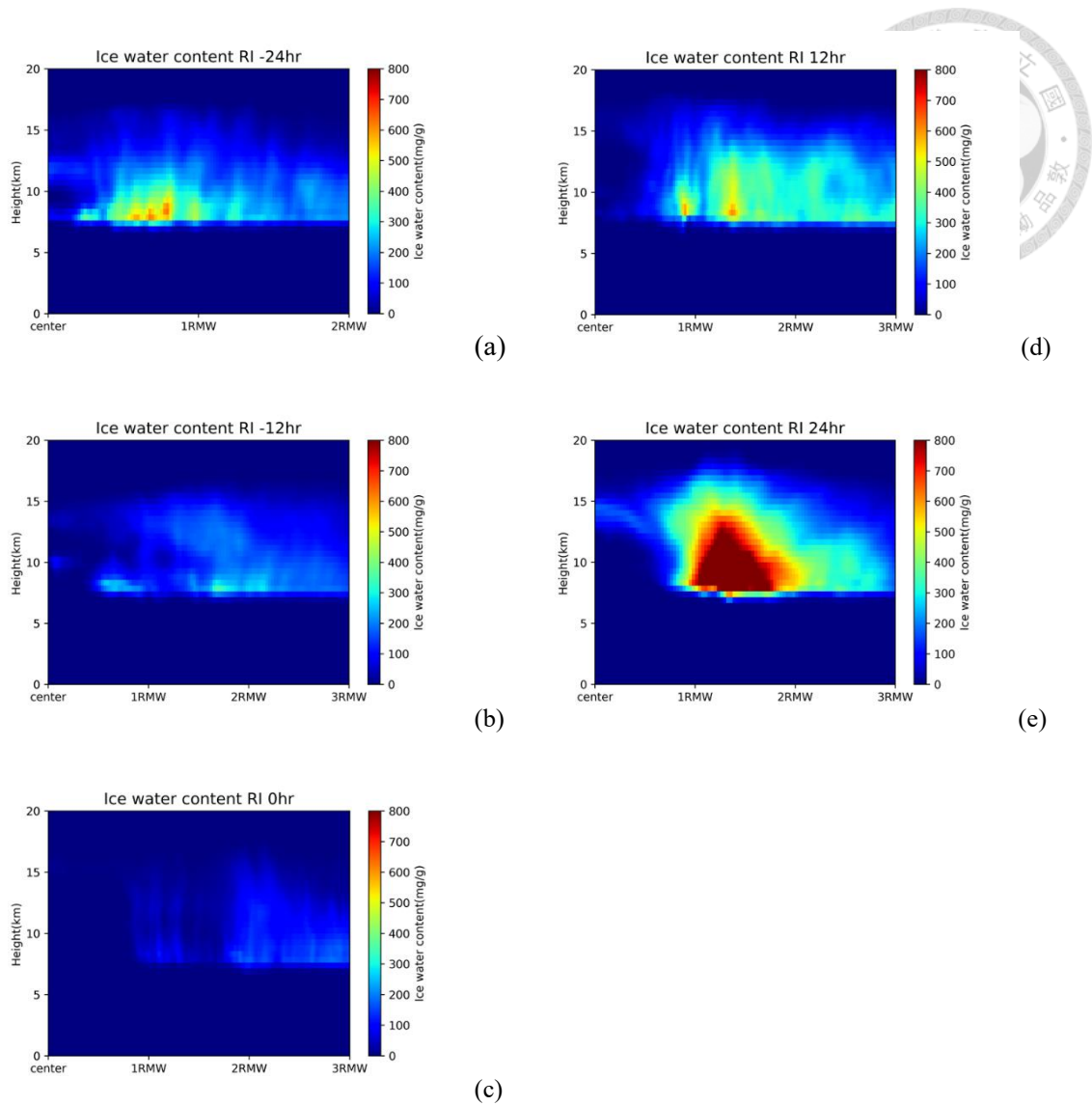


圖 3-28 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之軸對稱平均 IWC。X 軸表與颱風中心之距離 (以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

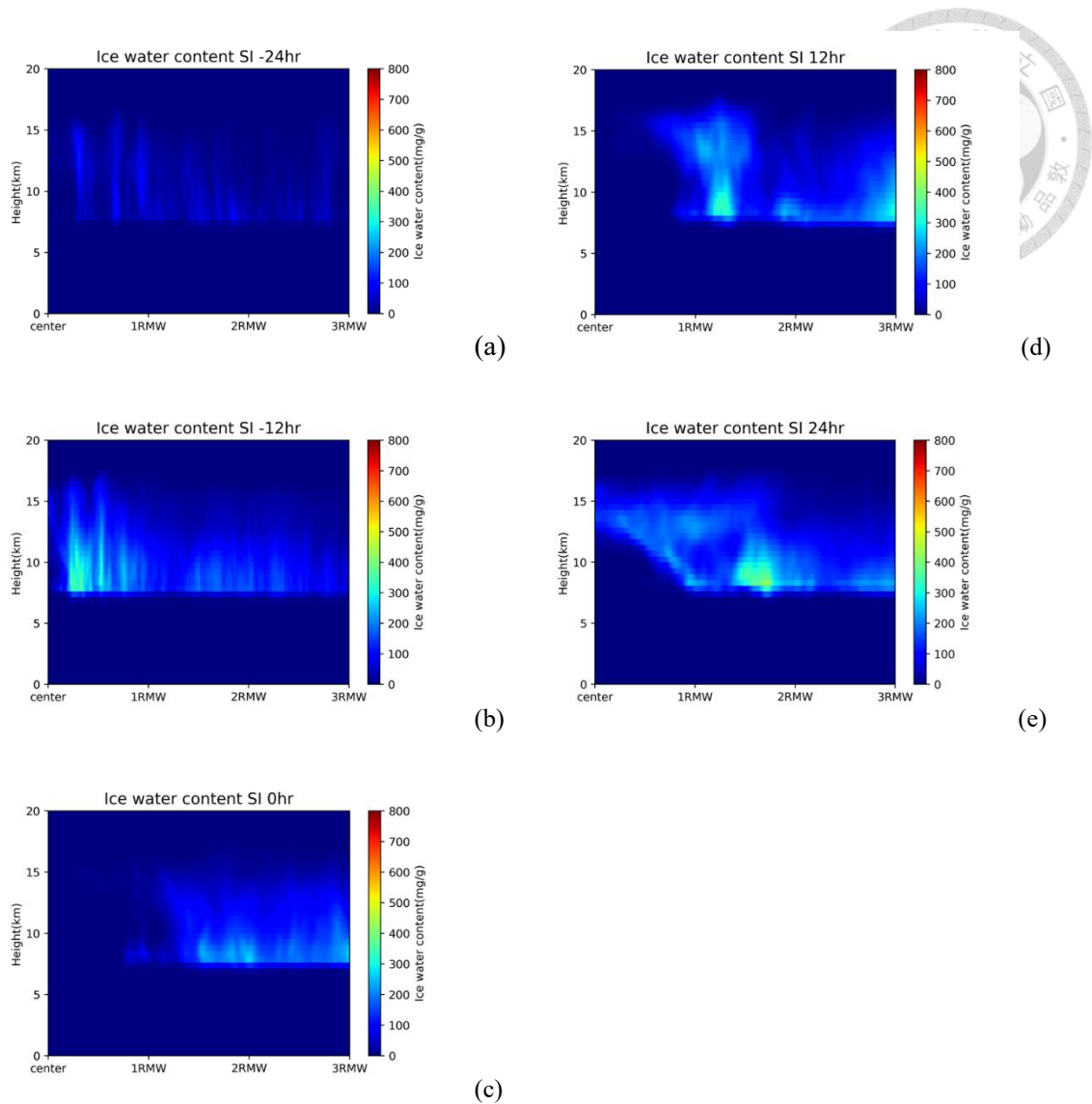


圖 3-29 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之軸對稱平均 IWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

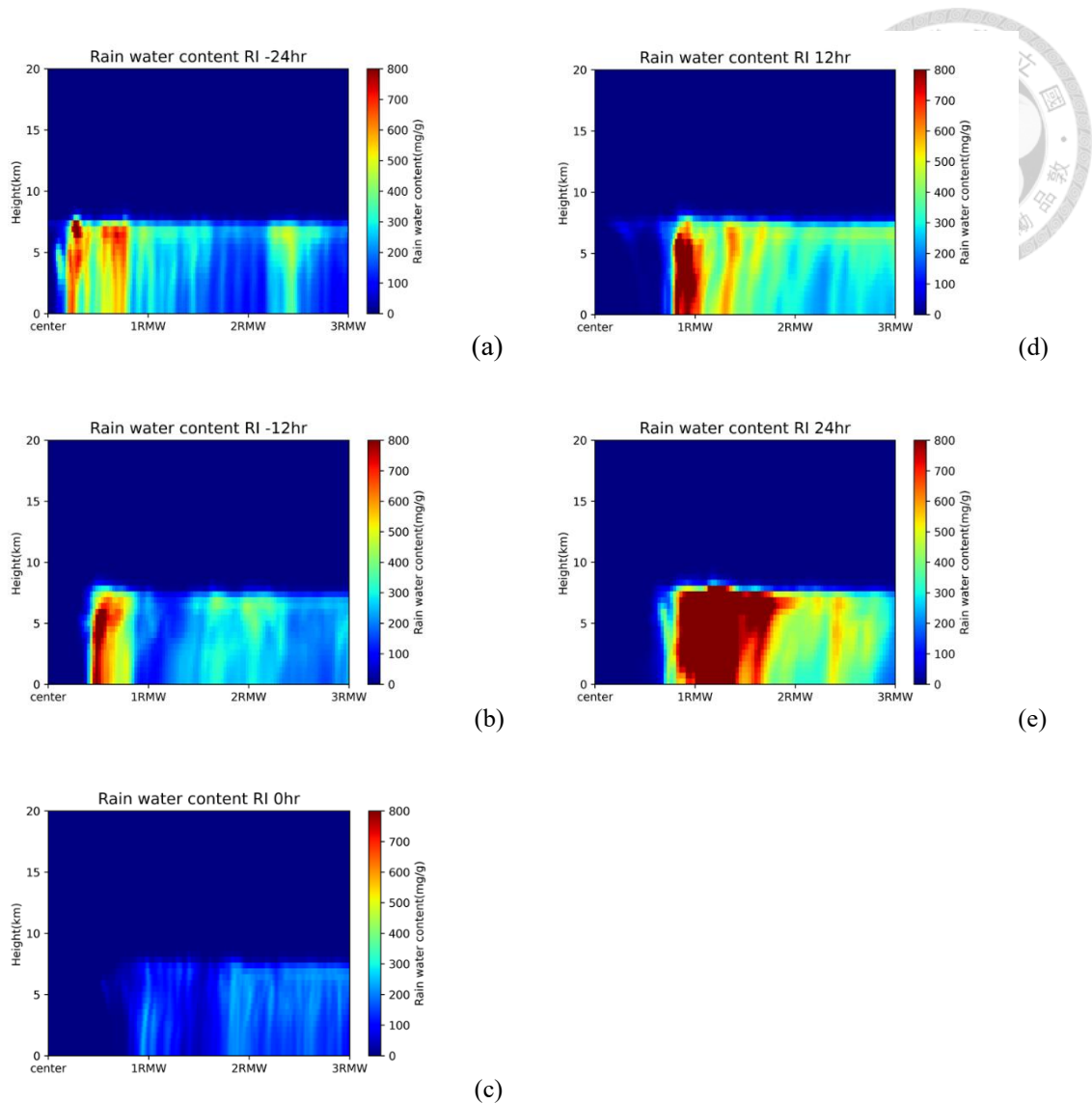


圖 3-30 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離 (以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

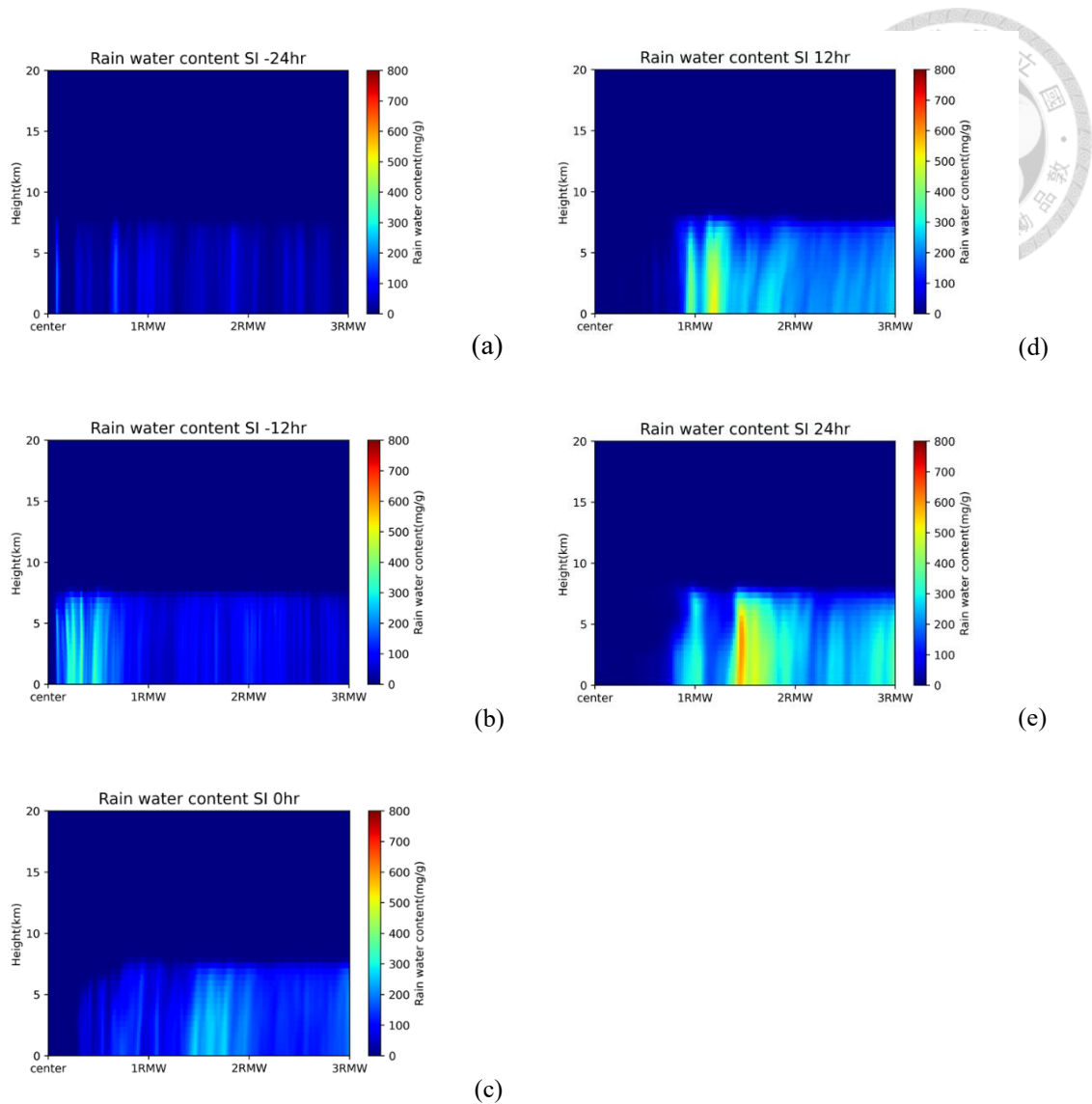


圖 3-31 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

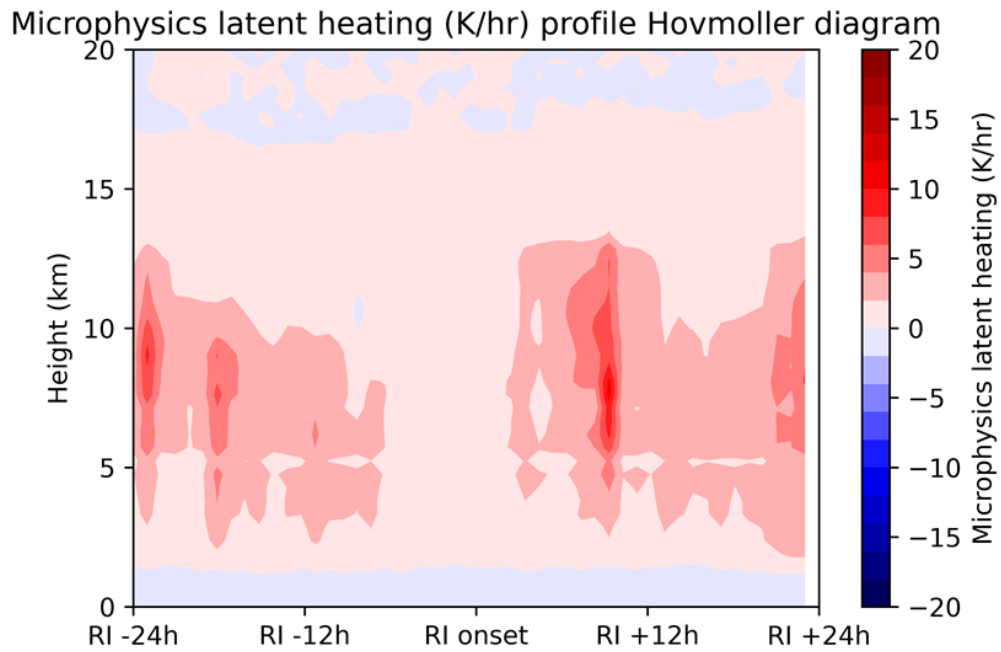


圖 3-32 RI 個案蘇力基颱風(2021)潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 RI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。

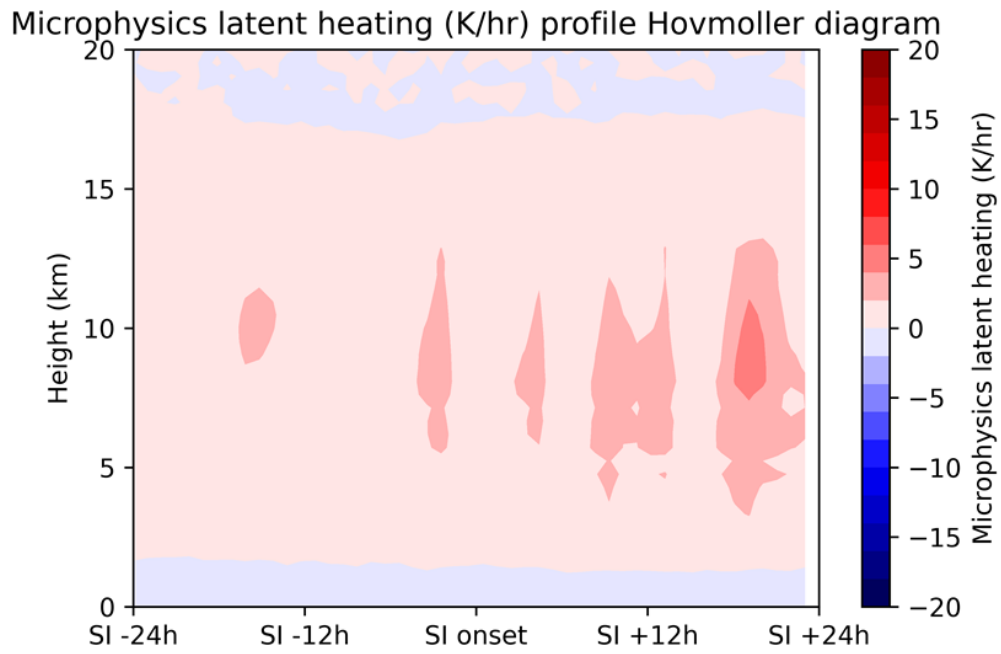


圖 3-33 SI 個案珊珊颱風(2021)潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 SI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。

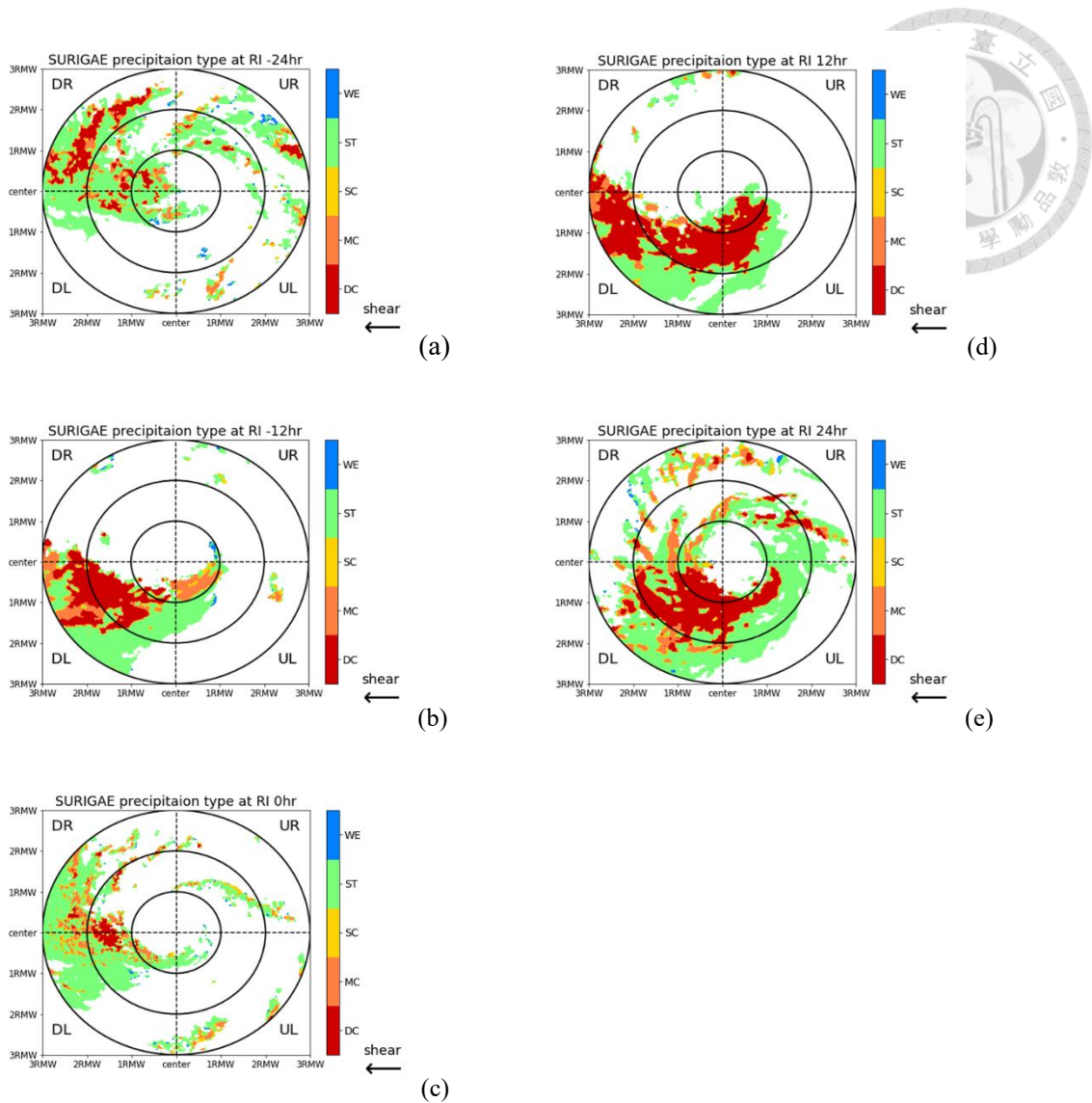


圖 3-34 WRF 模式模擬 RI 個案蘇力基颱風(2021)之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

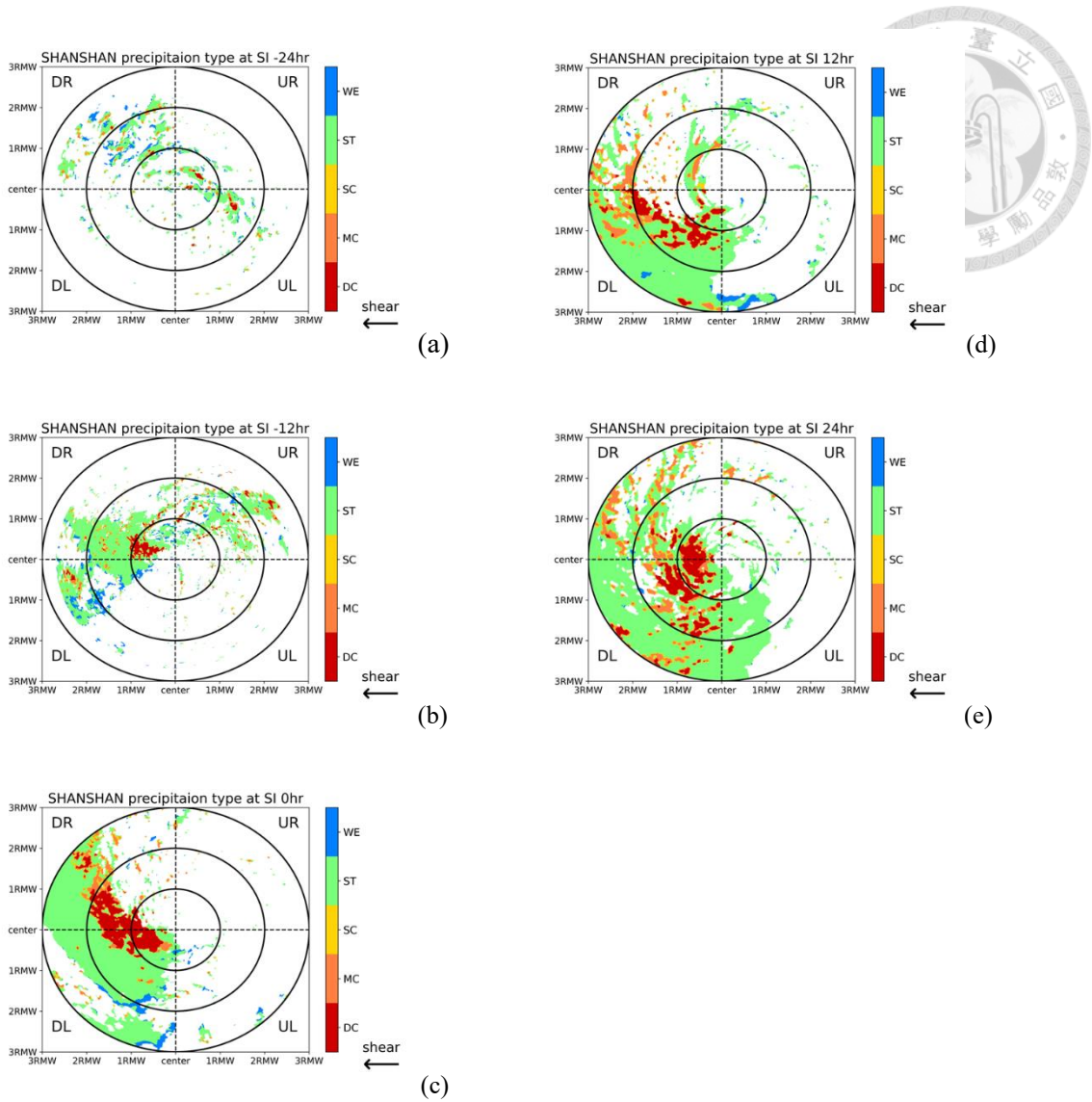


圖 3-35 WRF 模式模擬 SI 個案珊珊颱風(2018)之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

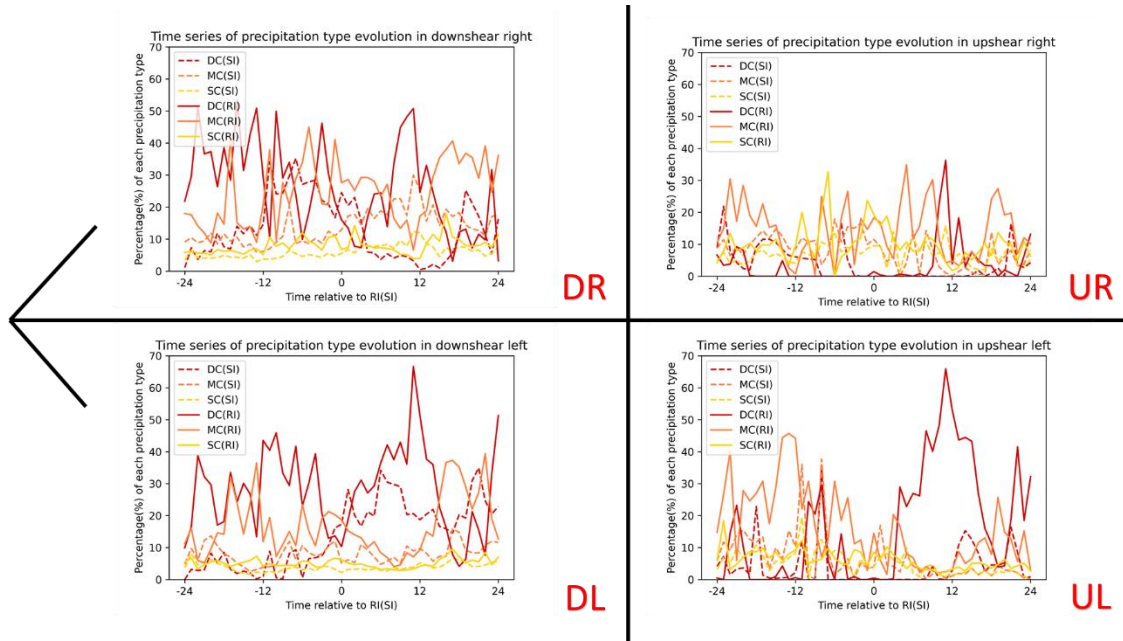


圖 3-36 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總降水格點之比例。深紅實線表 RI 個案 DC 比例，橘色實線表 RI 個案 MC 比例，黃色實線表 RI 個案 SC 比例，深紅虛線表 SI 個案 DC 比例，橘色虛線表 SI 個案 MC 比例，黃色虛線表 SI 個案 SC 比例。

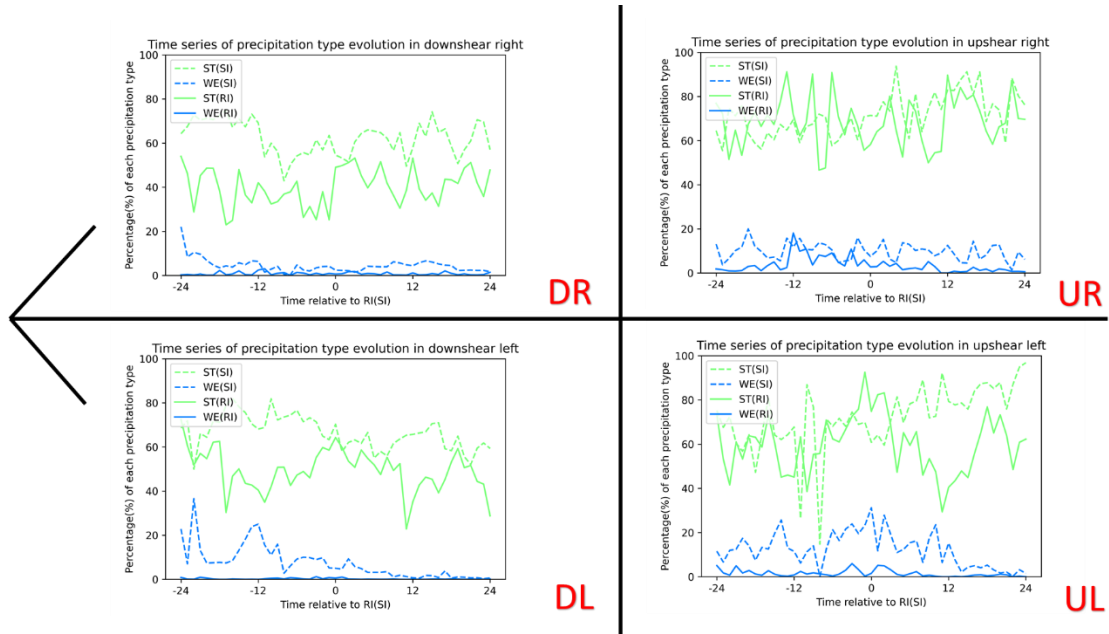


圖 3-37 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總降水格點之比例。綠實線表 RI 個案 ST 比例，藍色實線表 RI 個案 WE 比例，綠虛線表 SI 個案 ST 比例，藍色虛線表 SI 個案 WE 比例。

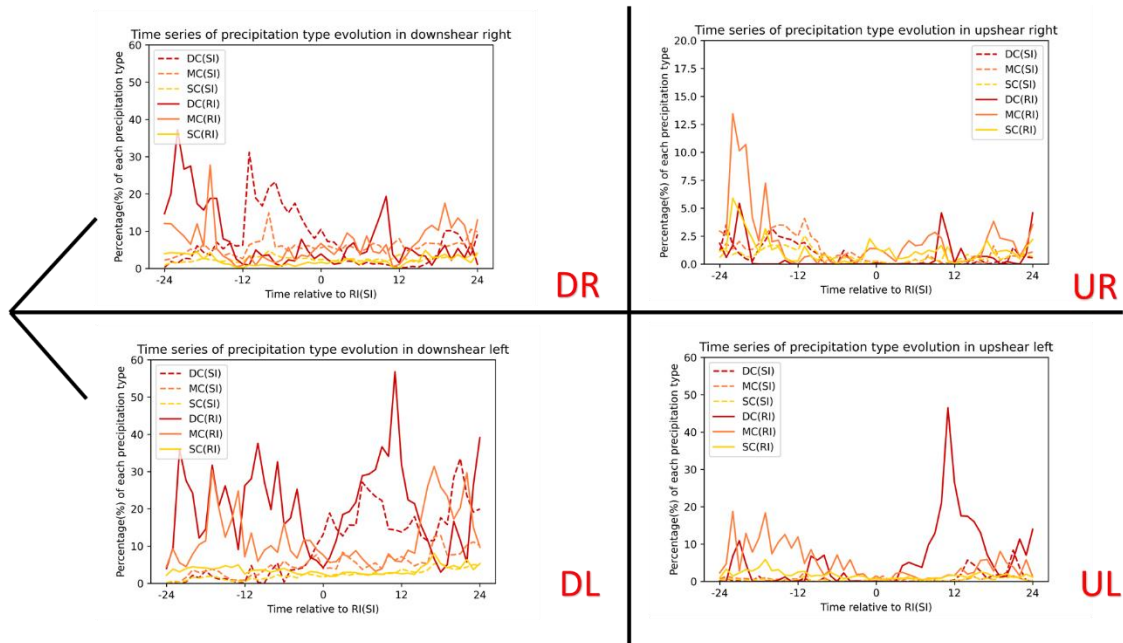


圖 3-38 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。深紅實線表 RI 個案 DC 比例，橘色實線表 RI 個案 MC 比例，黃色實線表 RI 個案 SC 比例，深紅虛線表 SI 個案 DC 比例，橘色虛線表 SI 個案 MC 比例，黃色虛線表 SI 個案 SC 比例。

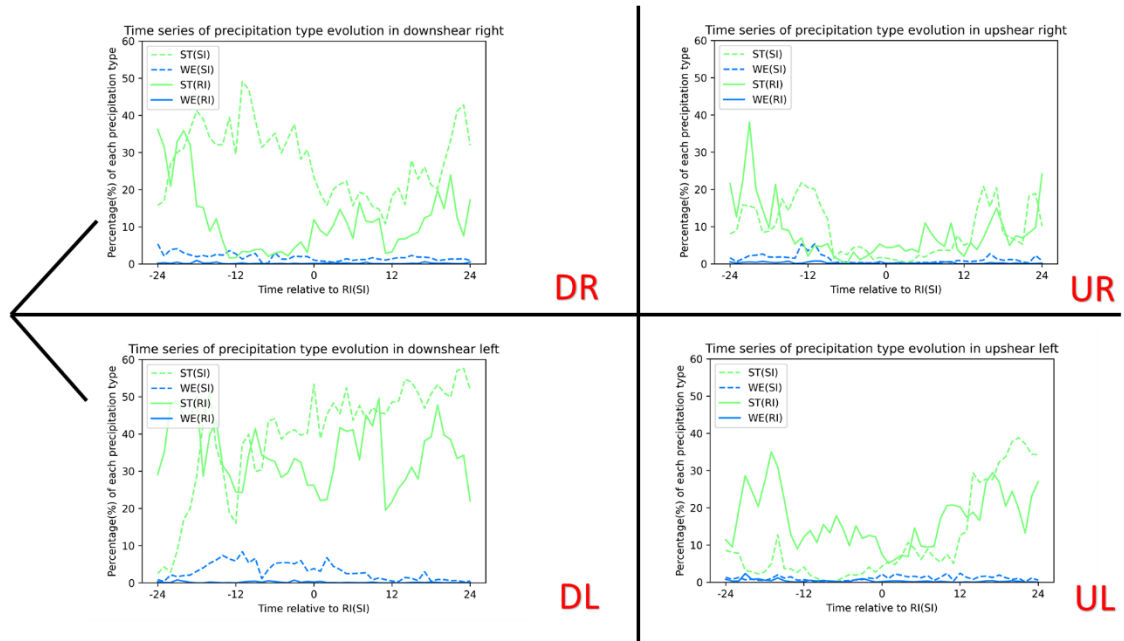


圖 3-39 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。綠實線表 RI 個案 ST 比例，藍色實線表 RI 個案 WE 比例，綠虛線表 SI 個案 ST 比例，藍色虛線表 SI 個案 WE 比例。

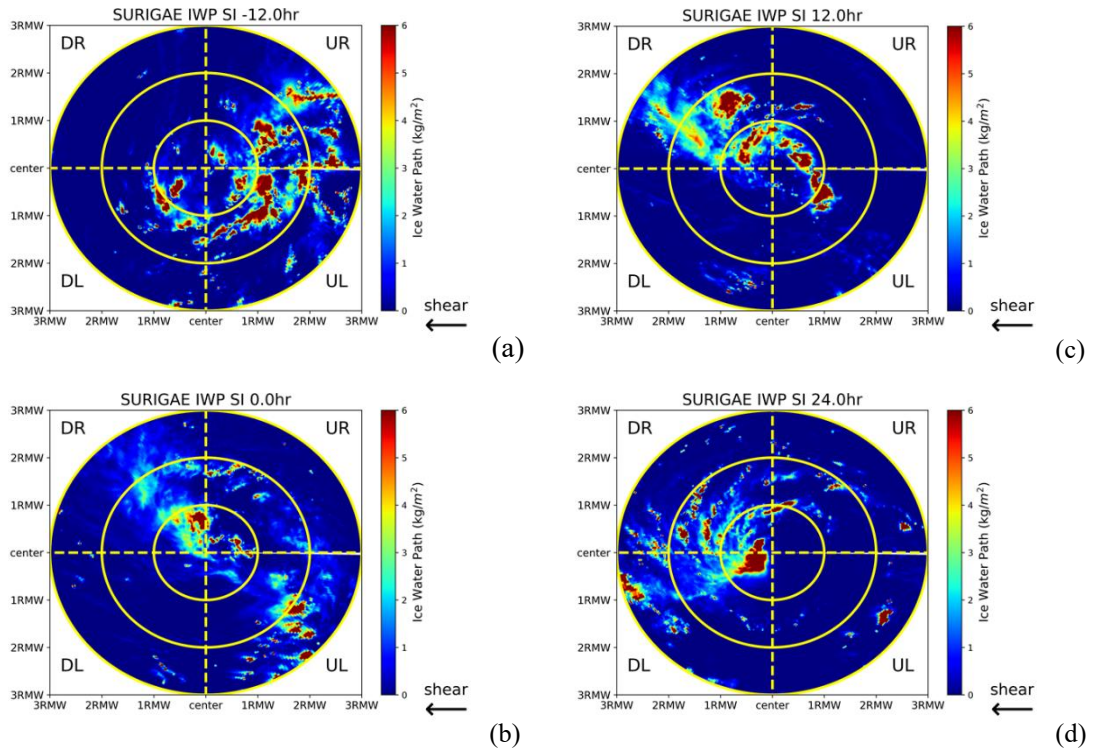


圖 3-40 WRF 模式模擬蘇力基颱風(2021)SI 期間之 IWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

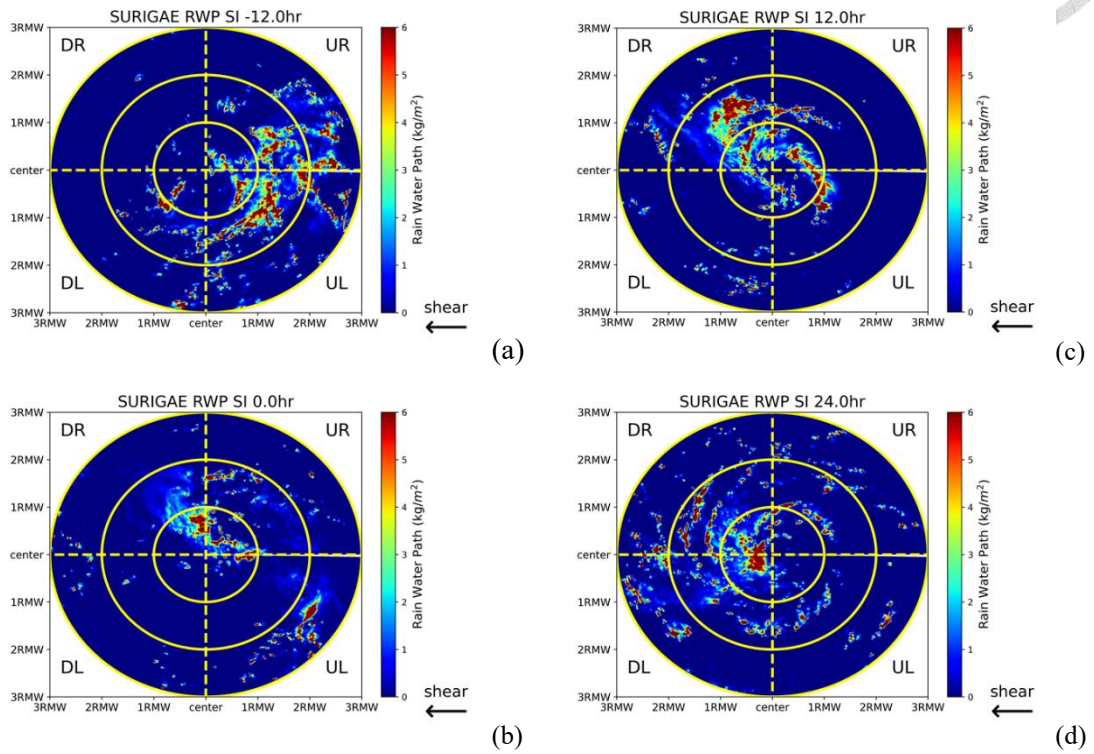


圖 3-41 WRF 模式模擬蘇力基颱風(2021)SI 期間之 RWP。黃色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

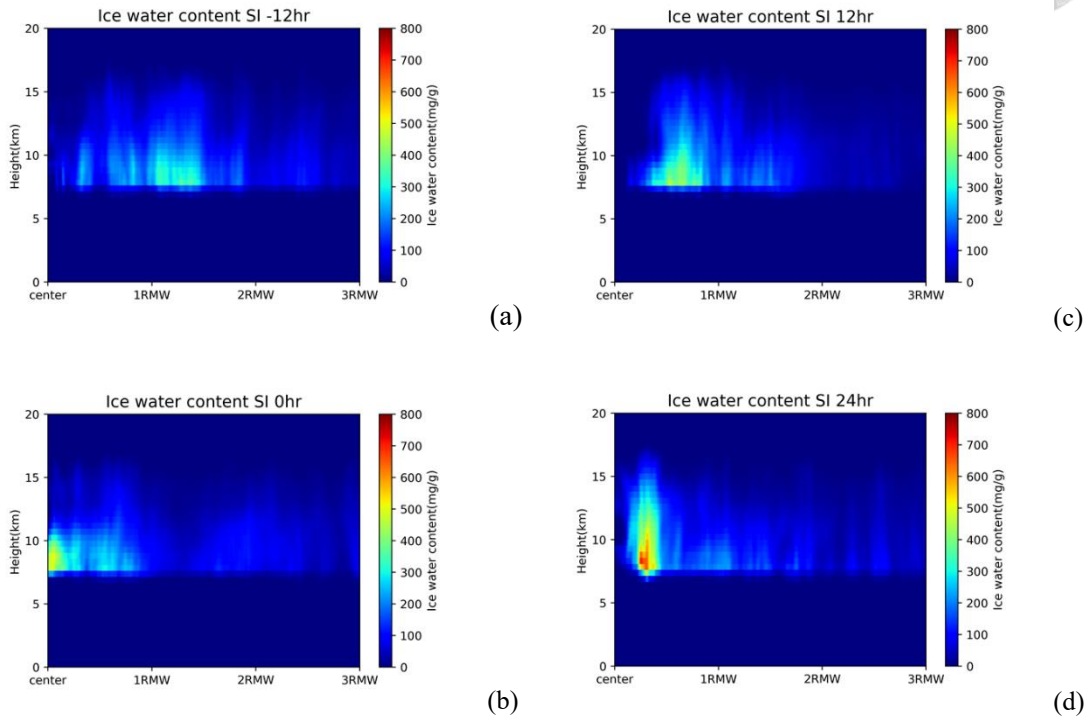


圖 3-42 WRF 模式蘇力基颱風(2021)SI 期間之之軸對稱平均 IWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(C)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

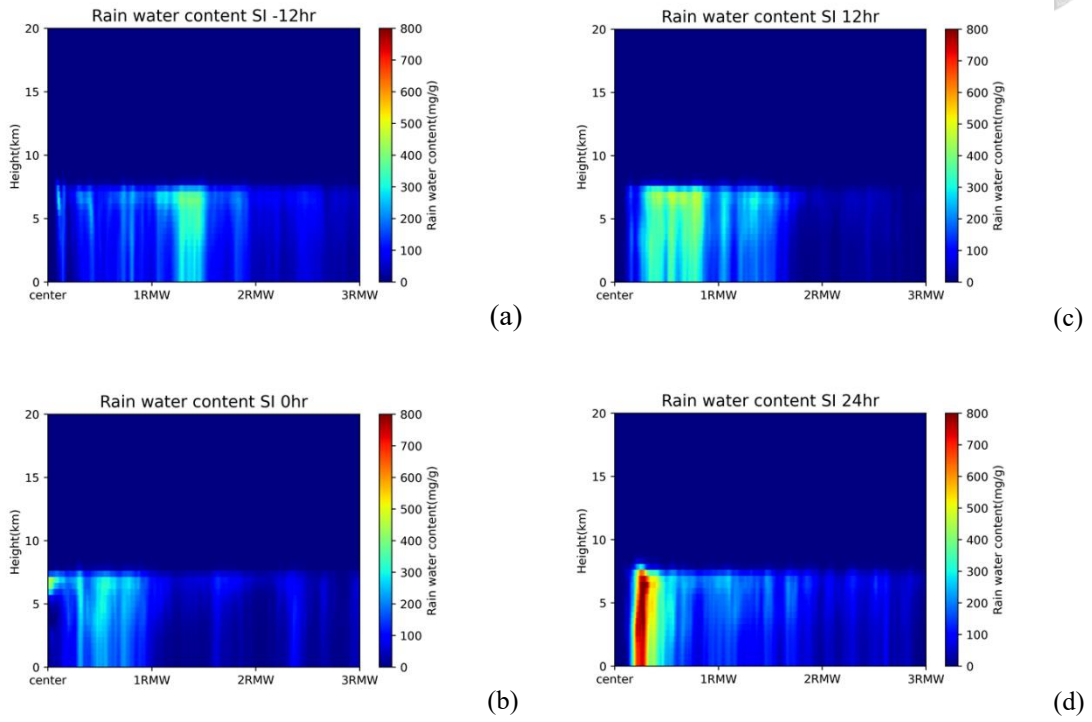


圖 3-43 WRF 模式蘇力基颱風(2021)SI 期間之之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

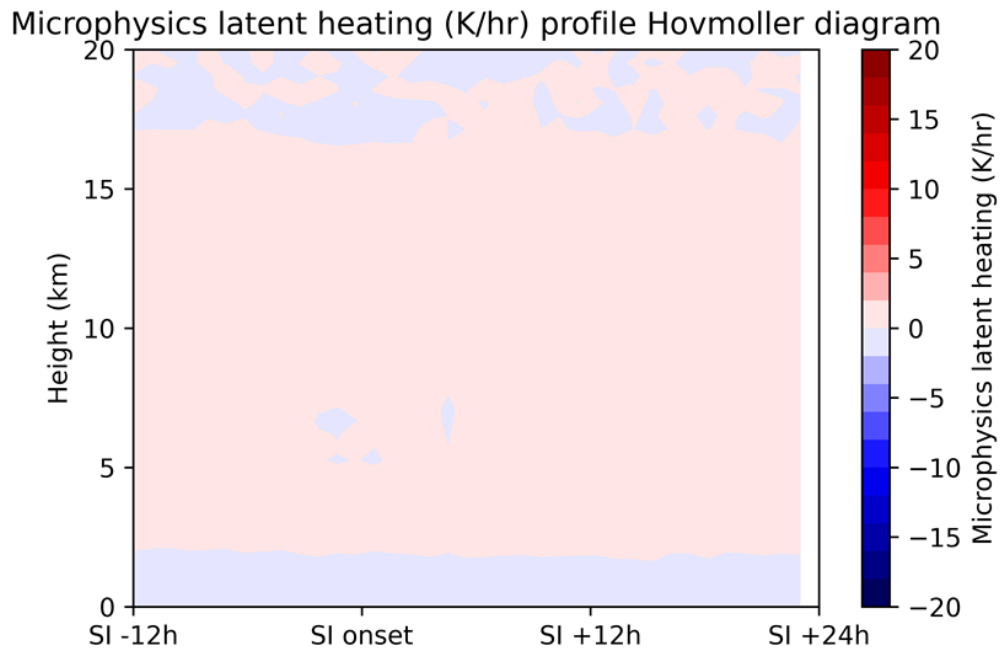


圖 3-44 蘇力基颶風(2021) SI 期間潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 SI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。

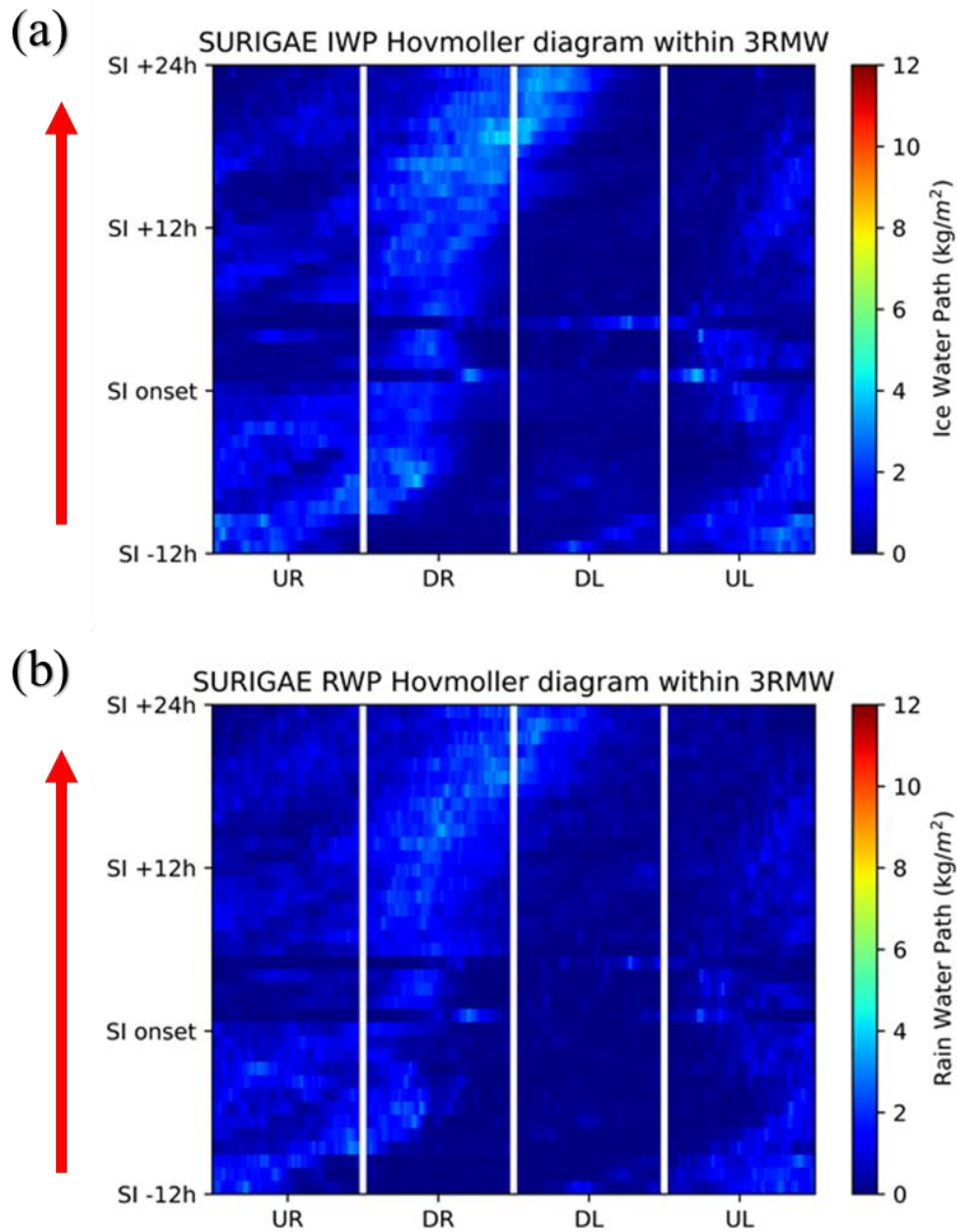


圖 3-45 蘇力基颱風 SI 期間哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)IWP、(b)RWP。

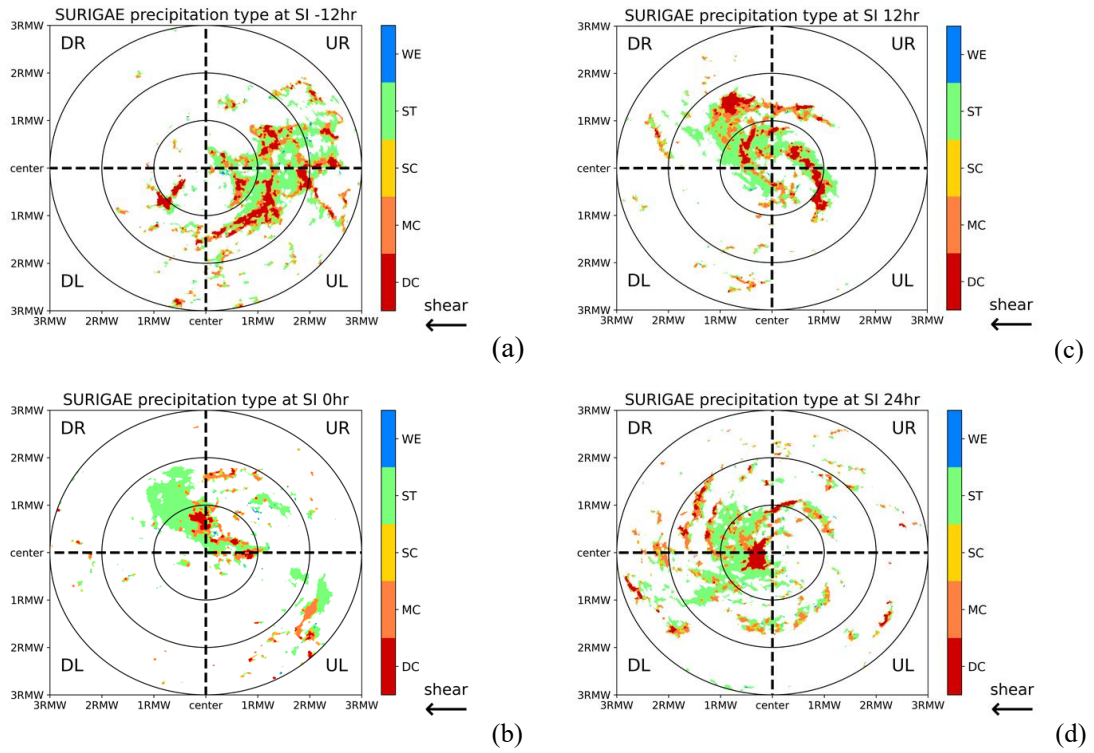


圖 3-46 WRF 模式模擬蘇力基颱風(2021)SI 期間之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 12 小時、(b)SI 開始、(c)SI 後 12 小時、(d)SI 後 24 小時。

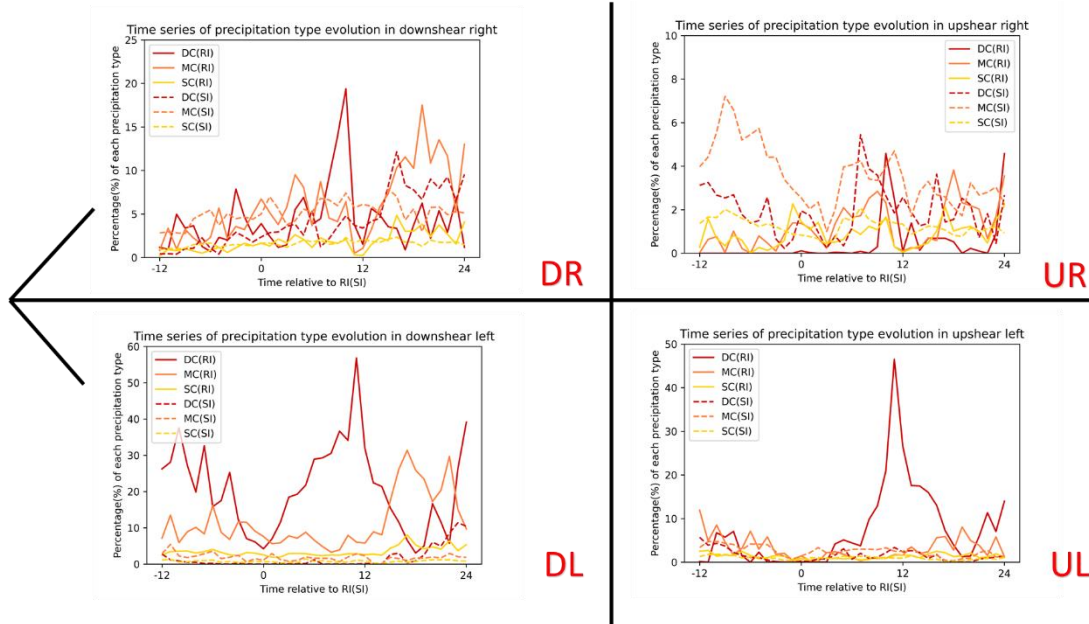


圖 3-47 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。深紅實線表蘇力基颱風 RI 期間 DC 比例，橘色實線表蘇力基颱風 RI 期間 MC 比例，黃色實線表蘇力基颱風 RI 期間 SC 比例，深紅虛線表蘇力基颱風 SI 期間 DC 比例，橘色虛線表蘇力基颱風 SI 期間 MC 比例，黃色虛線表蘇力基颱風 SI 期間 SC 比例。

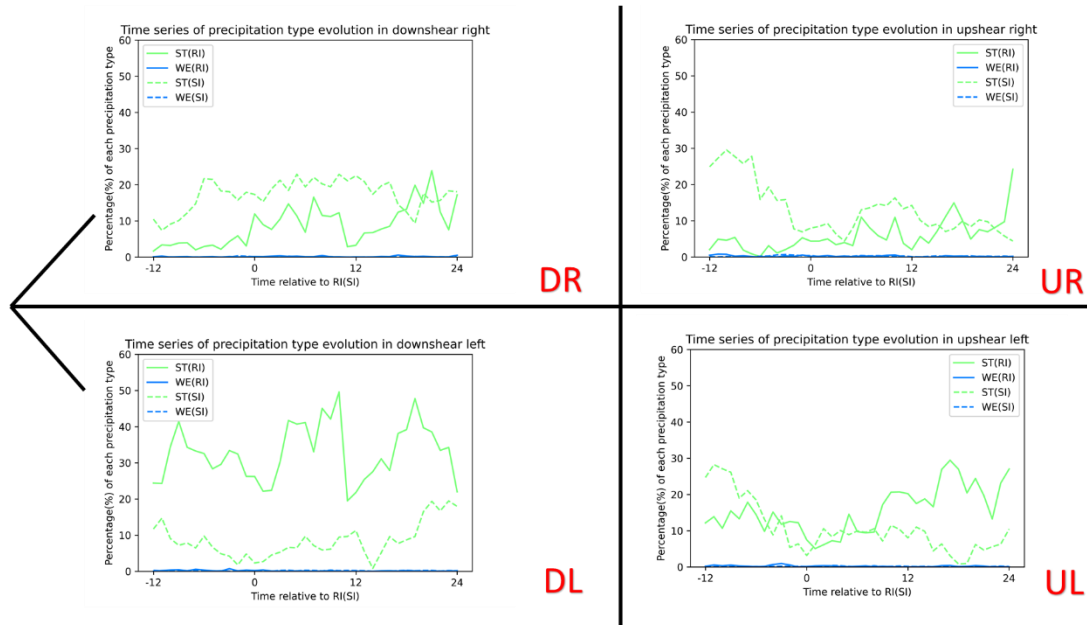


圖 3-48 降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對增強(RI/SI)之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。綠實線表蘇力基颱風 RI 期間 ST 比例，藍色實線表蘇力基颱風 RI 期間 WE 比例，綠虛線表蘇力基颱風 SI 期間 ST 比例，藍色虛線表蘇力基颱風 SI 期間 WE 比例。

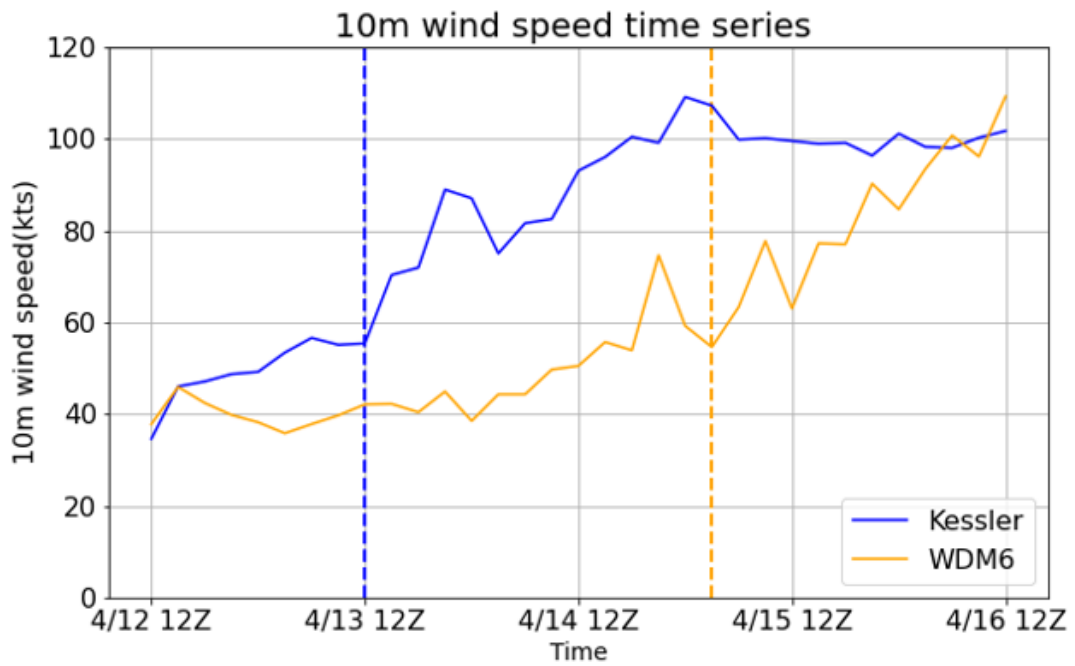


圖 4-1 蘇力基颱風(2021)10 米風極大值時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 10 米風之量值。橘線表控制組使用 WDM6 模擬之颱風 10 米風極大值，藍線表實驗組使用 Kessler 模擬之颱風 10 米風極大值。橘粗垂直線表 WDM6 模擬中颱風 RI 開始的時間點，藍粗垂直線表 Kessler 模擬之颱風 RI 開始的時間點。

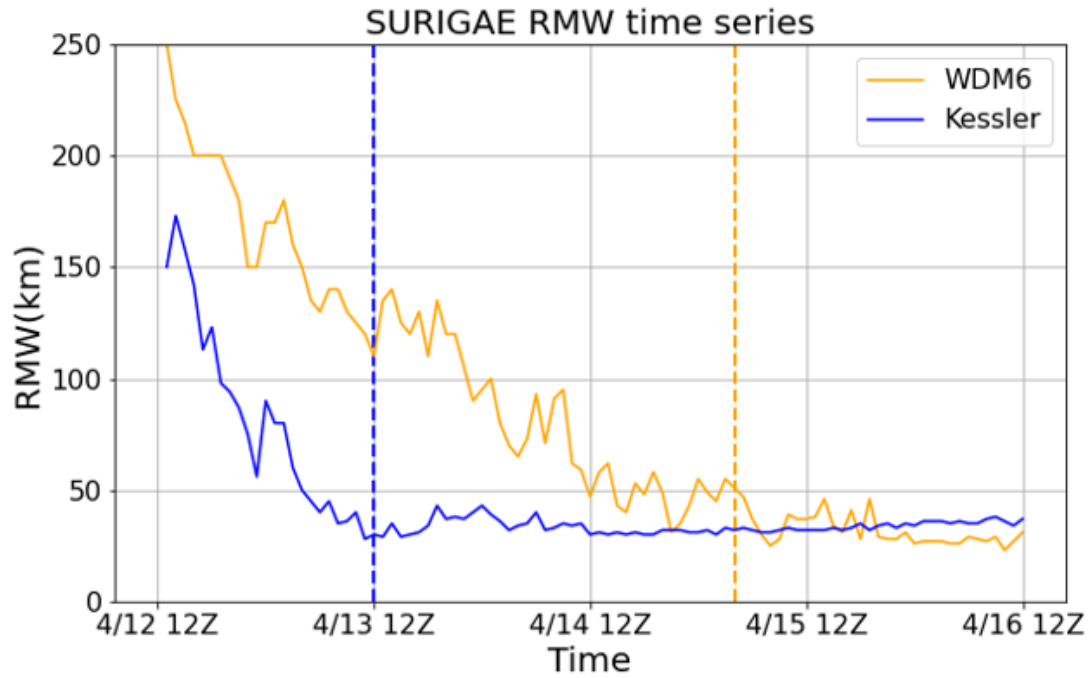


圖 4-2 蘇力基颱風(2021)RMW 時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 RMW 之量值。橘線表控制組使用 WDM6 模擬之 RMW，藍線表實驗組使用 Kessler 模擬之 RMW。橘粗垂直線表 WDM6 模擬中颱風 RI 開始的時間點，藍粗垂直線表 Kessler 模擬之颱風 RI 開始的時間點。

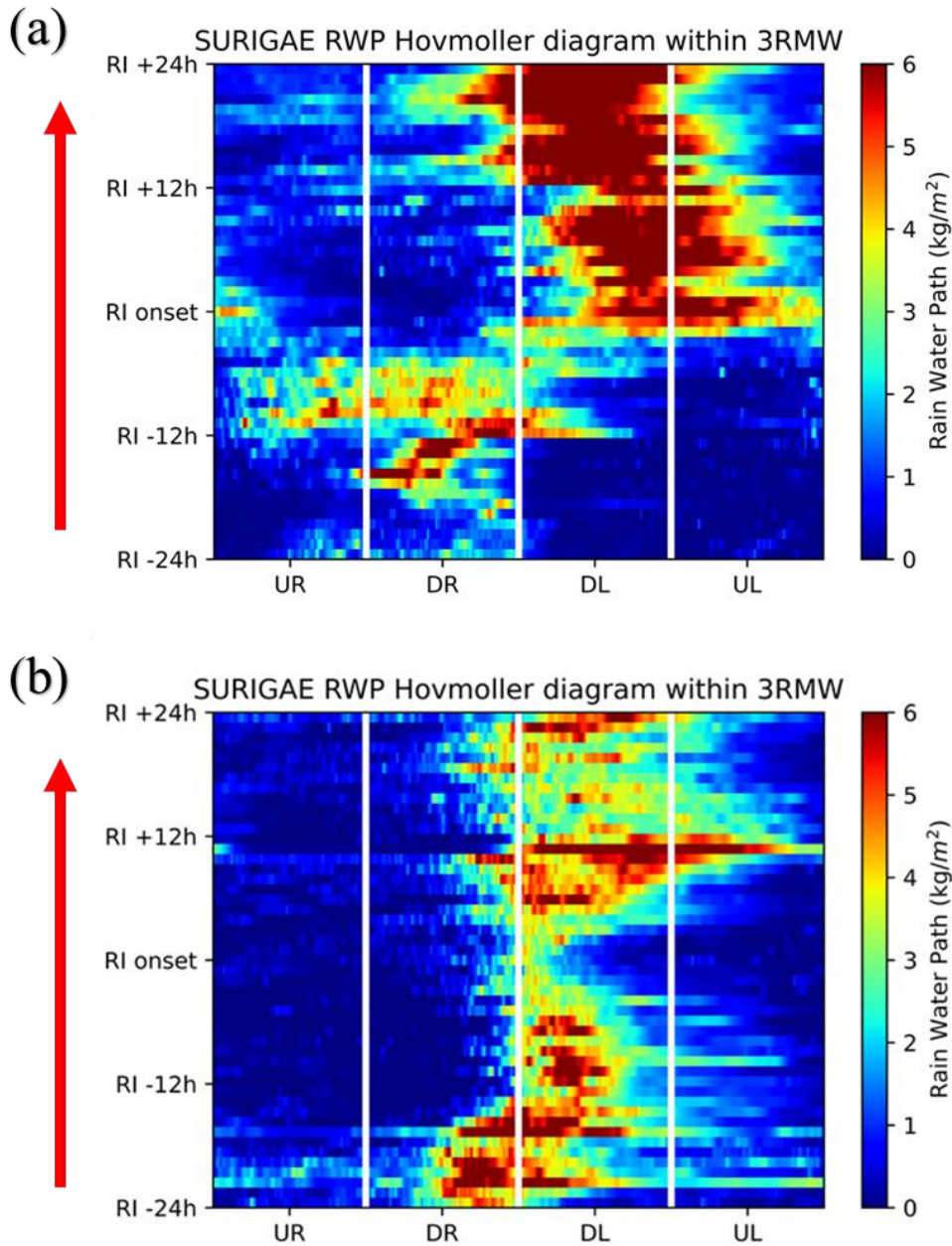


圖 4-3 蘇力基颱風 RWP 哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均 RWP 量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)Kessler scheme、(b)WDM6 scheme。

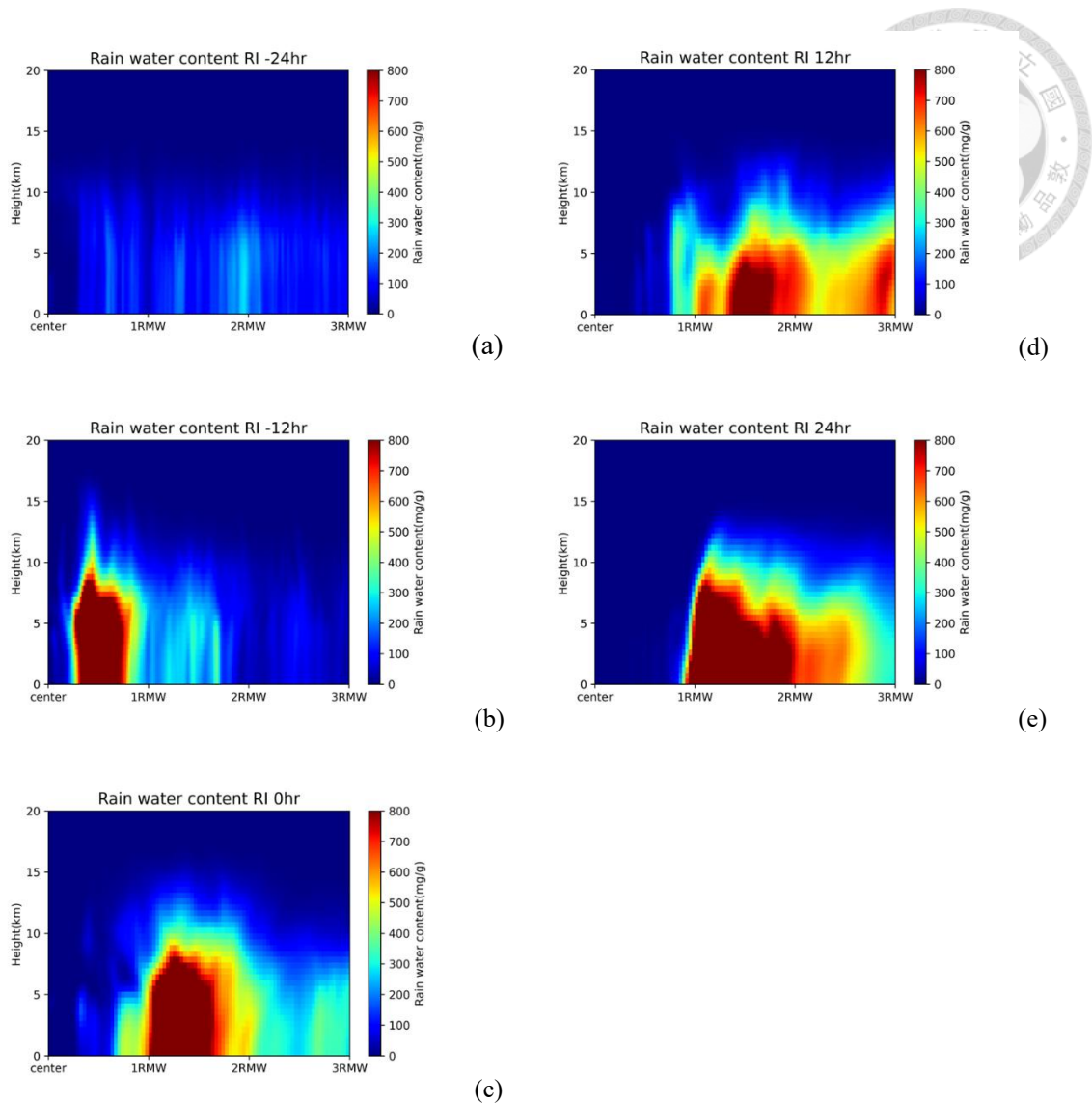
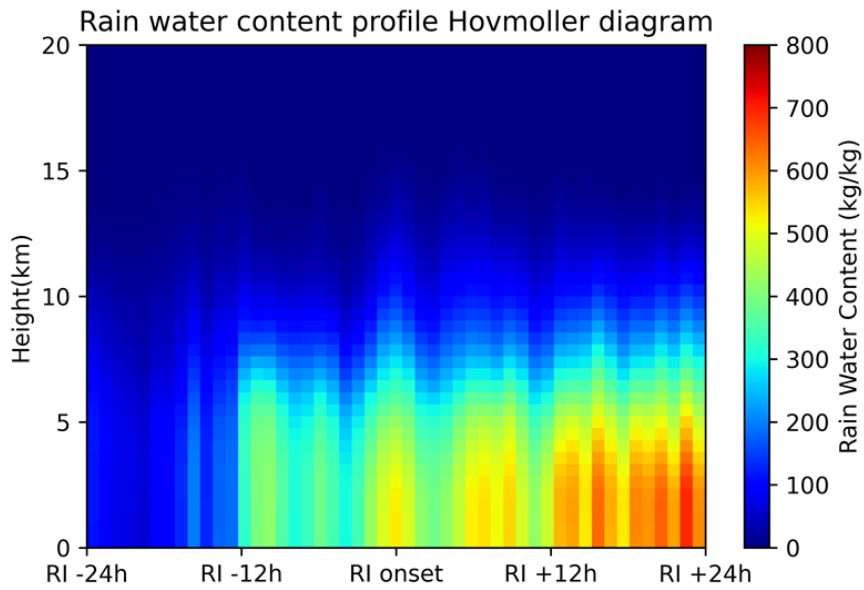


圖 4-4 WRF 模式暖雲實驗組 RI 個案蘇力基颱風(2021)之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

(a)



(b)

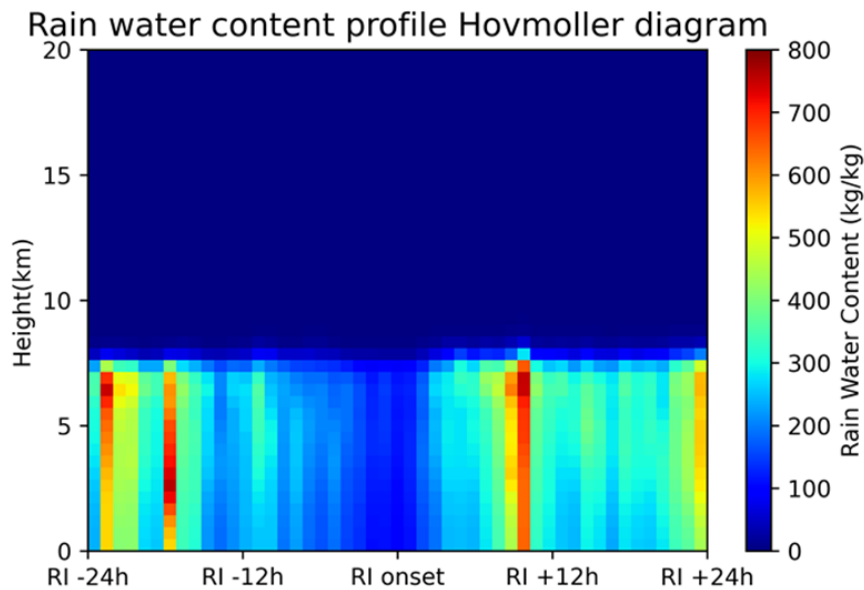
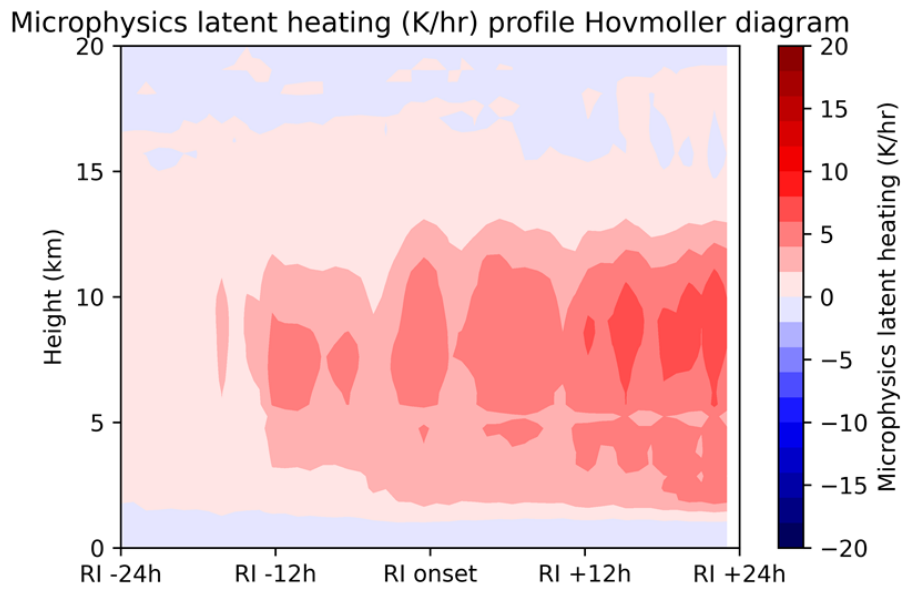


圖 4-5 RI 個案蘇力基颱風(2021)RWC 取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 RI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。(a)Kessler scheme、(b)WDM6 scheme。

(a)



(b)

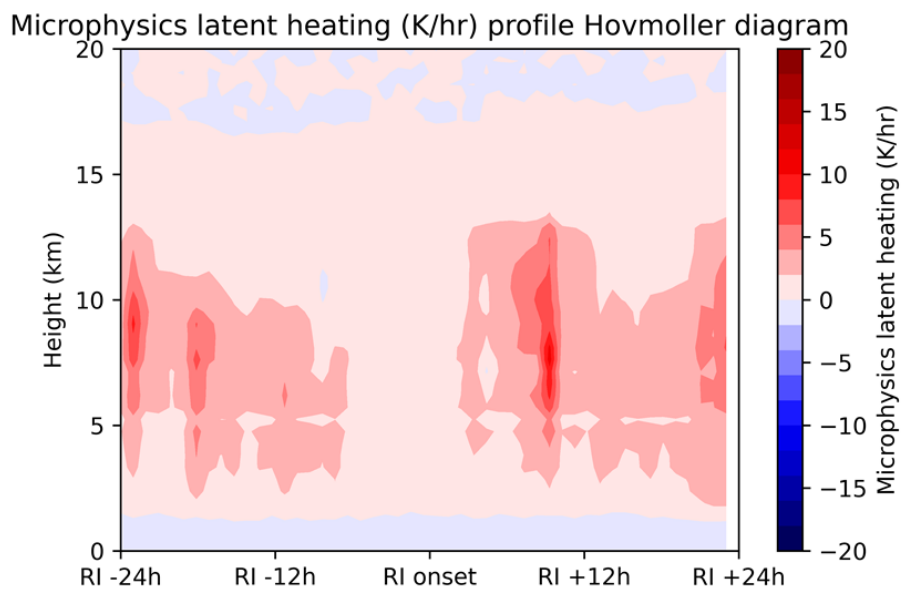


圖 4-6 RI 個案蘇力基颱風(2021)潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 RI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。(a)Kessler scheme、(b)WDM6 scheme。

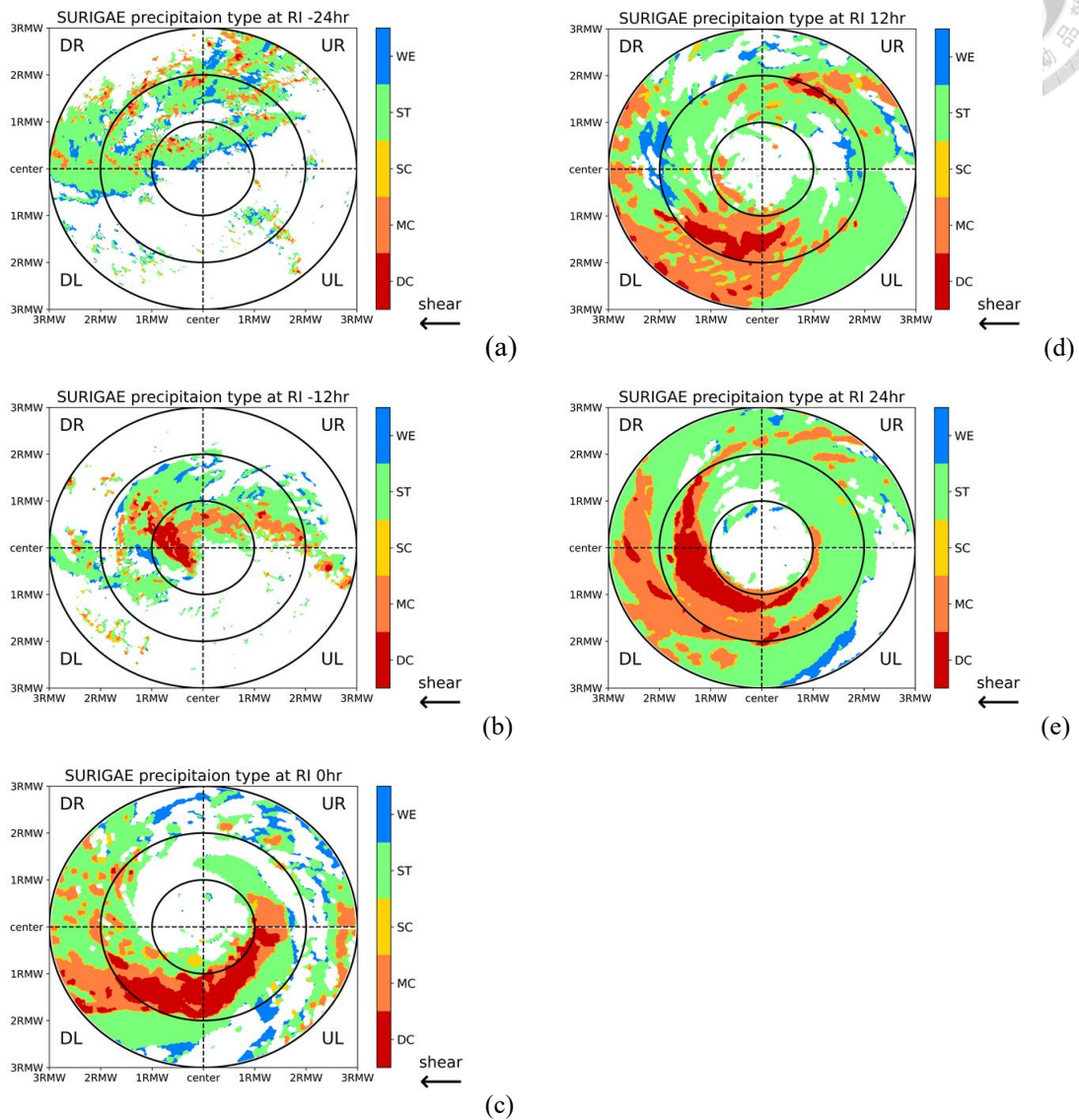
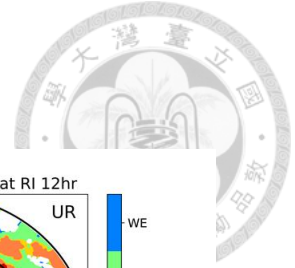


圖 4-7 WRF 模式暖雲實驗組 RI 個案蘇力基颱風(2021)之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)RI 前 24 小時、(b)RI 前 12 小時、(c)RI 開始、(d)RI 後 12 小時、(e)RI 後 24 小時。

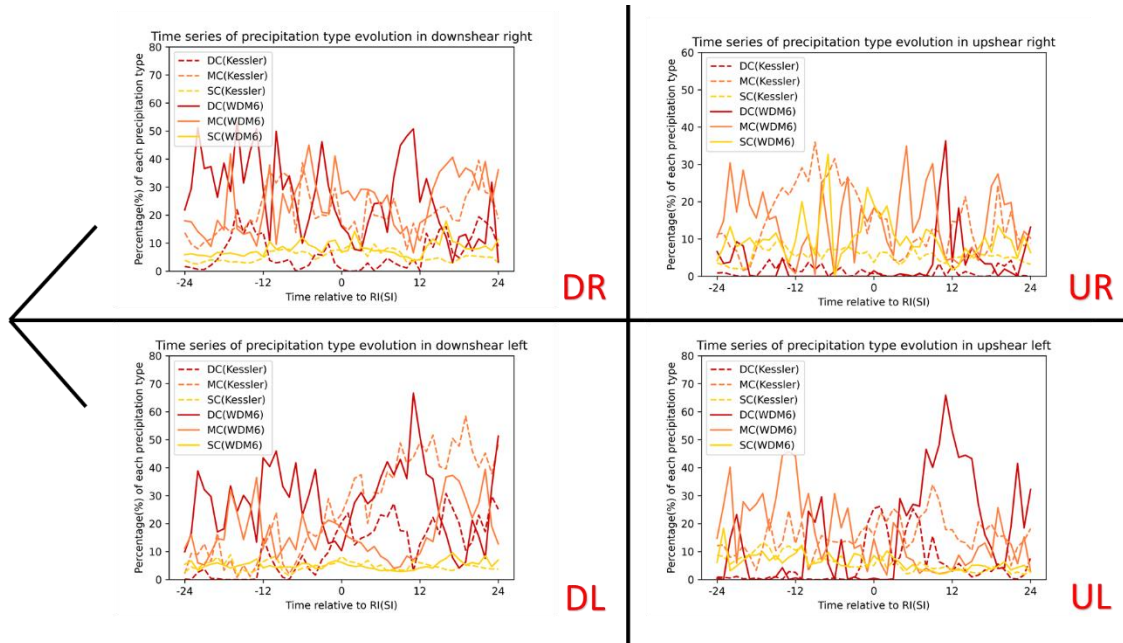


圖 4-8 RI 個案蘇力基颱風(2021)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總降水格點之比例。深紅實線表控制組 DC 比例，橘色實線表控制組 MC 比例，黃色實線表控制組 SC 比例，深紅虛線表暖雲實驗組 DC 比例，橘色虛線表暖雲實驗組 MC 比例，黃色虛線表暖雲實驗組 SC 比例。

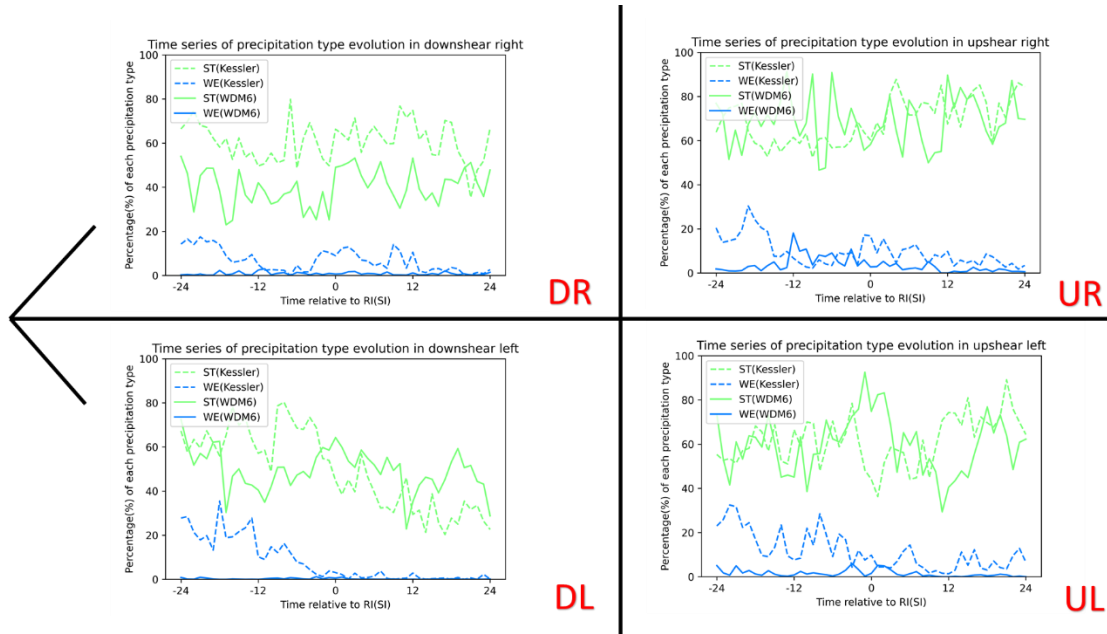


圖 4-9 RI 個案蘇力基颱風(2021)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總降水格點之比例。綠實線表控制組 ST 比例，藍色實線表控制組 WE 比例，綠虛線表暖雲實驗組 ST 比例，藍色虛線表暖雲實驗組 WE 比例。

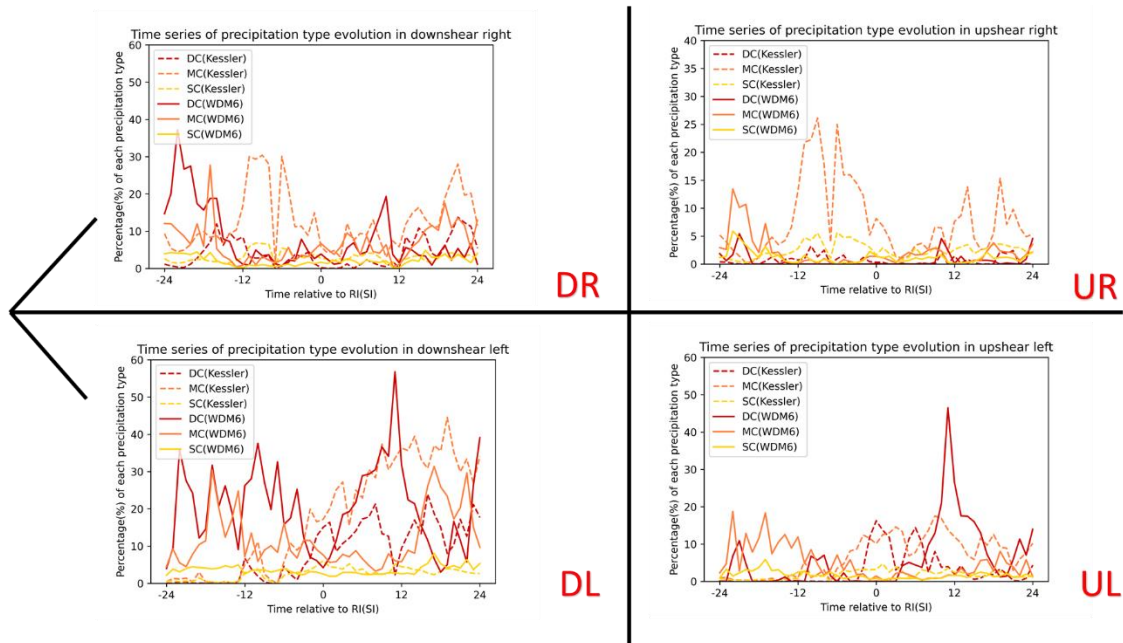


圖 4-10 RI 個案蘇力基颱風(2021)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。深紅實線表控制組 DC 比例，橘色實線表控制組 MC 比例，黃色實線表控制組 SC 比例，深紅虛線表暖雲實驗組 DC 比例，橘色虛線表暖雲實驗組 MC 比例，黃色虛線表暖雲實驗組 SC 比例。

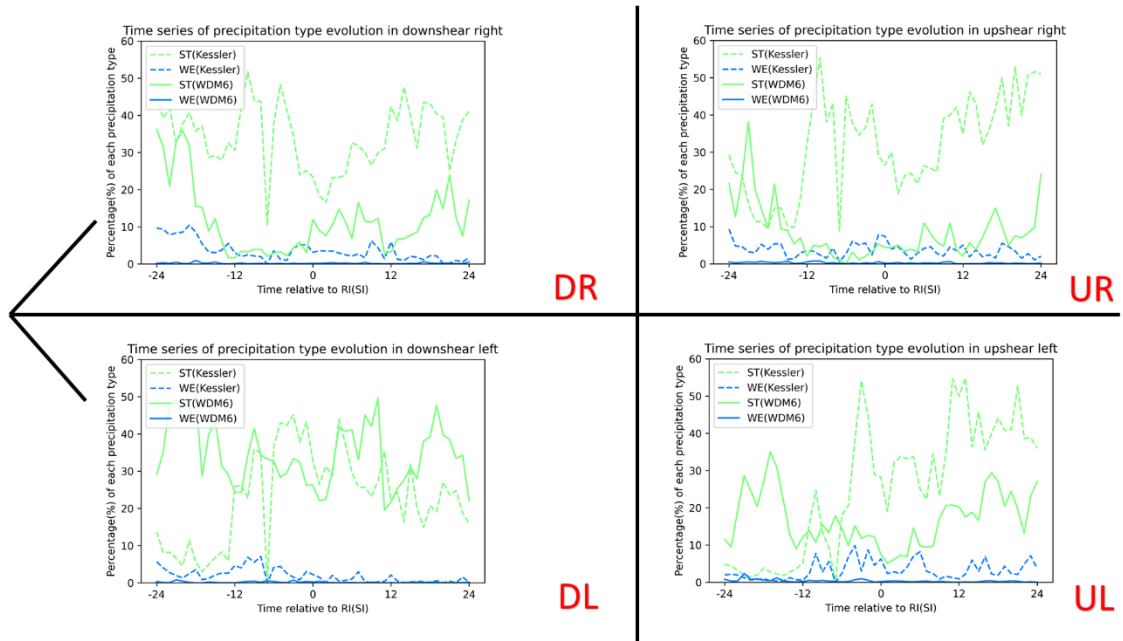


圖 4-11 RI 個案蘇力基颱風(2021)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。綠實線表控制組 ST 比例，藍色實線表控制組 WE 比例，綠虛線表暖雲實驗組 ST 比例，藍色虛線表暖雲實驗組 WE 比例。

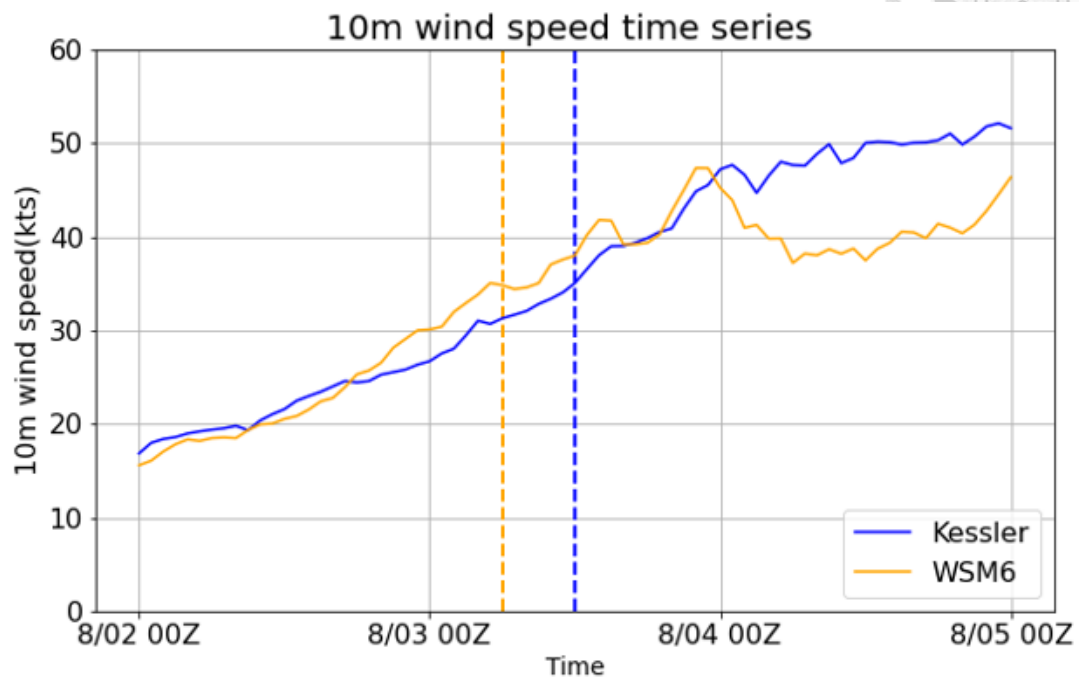


圖 4-12 珊珊颱風(2018)10 米風極大值時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 10 米風之量值。橘線表控制組使用 WSM6 模擬之颱風 10 米風極大值，藍線表實驗組使用 Kessler 模擬之颱風 10 米風極值。橘粗垂直線表 WSM6 模擬中颱風 SI 開始的時間點，藍粗垂直線表 Kessler 模擬之颱風 SI 開始的時間點。

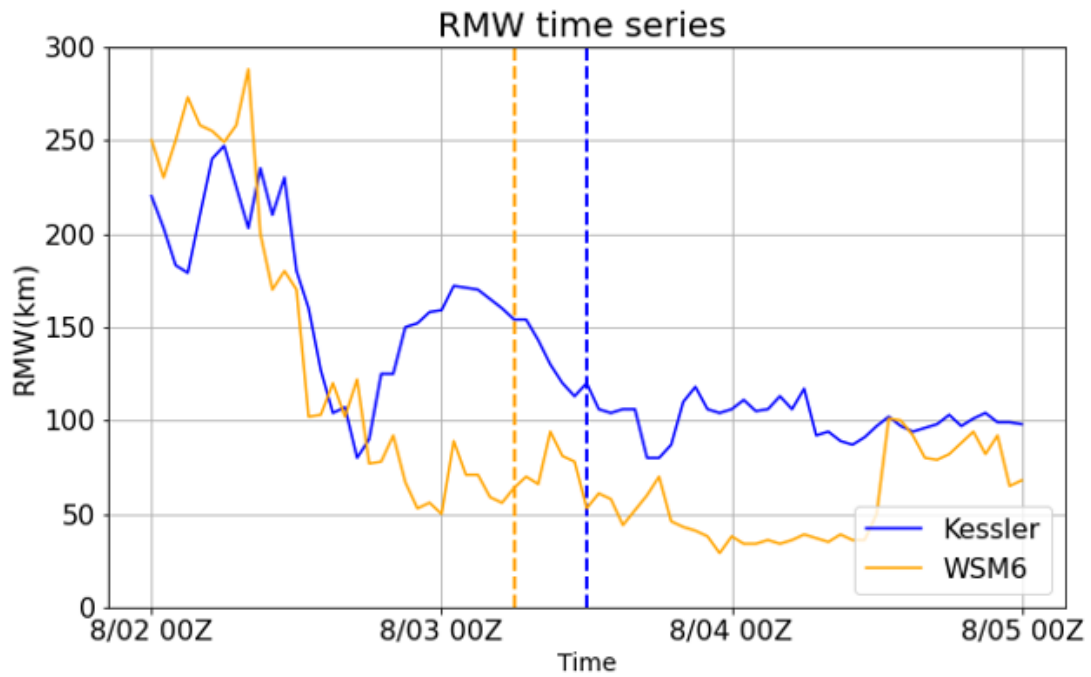


圖 4-13 珊珊颱風(2018)RMW 時序圖。X 軸表時間，Y 軸表 RMW 之量值。橘線表控制組使用 WSM6 模擬之 RMW，藍線表實驗組使用 Kessler 模擬之 RMW。橘粗垂直線表 WSM6 模擬中颱風 SI 開始的時間點，藍粗垂直線表 Kessler 模擬之颱風 SI 開始的時間點。

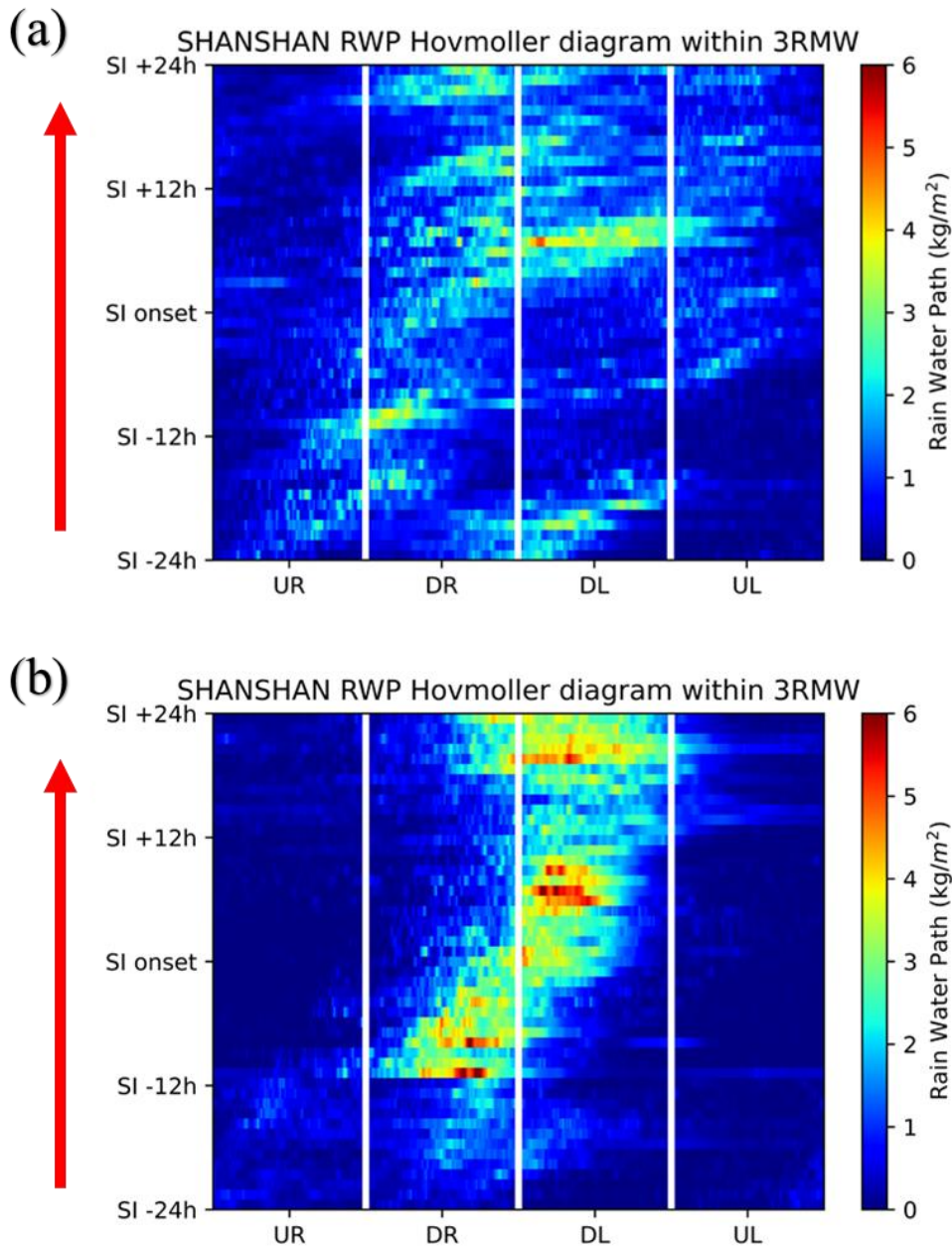
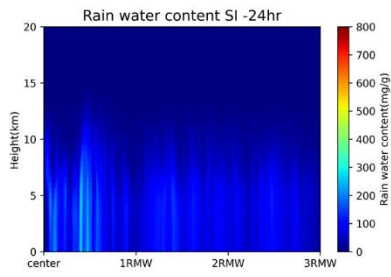
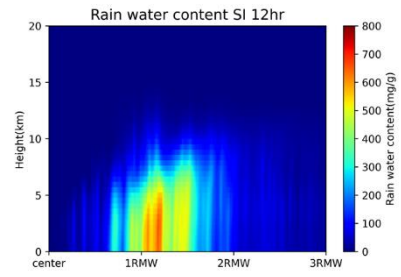


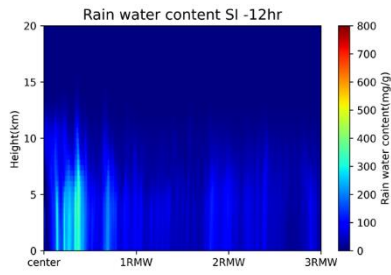
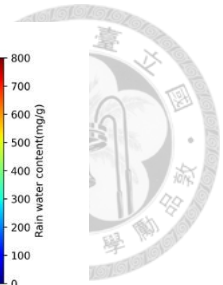
圖 4-14 珊珊颱風 RWP 哈默圖。色塊表 3RMW 內之平均 RWP 量值。X 軸表不同方位(象限)，Y 軸則表相對增強發生的時間。紅色箭頭說明時間由圖下方逐漸向上進行。(a)Kessler scheme、(b)WSM6 scheme。



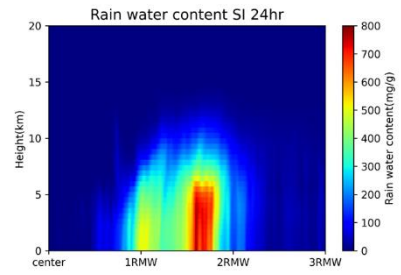
(a)



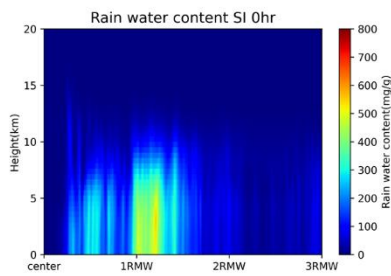
(d)



(b)



(e)

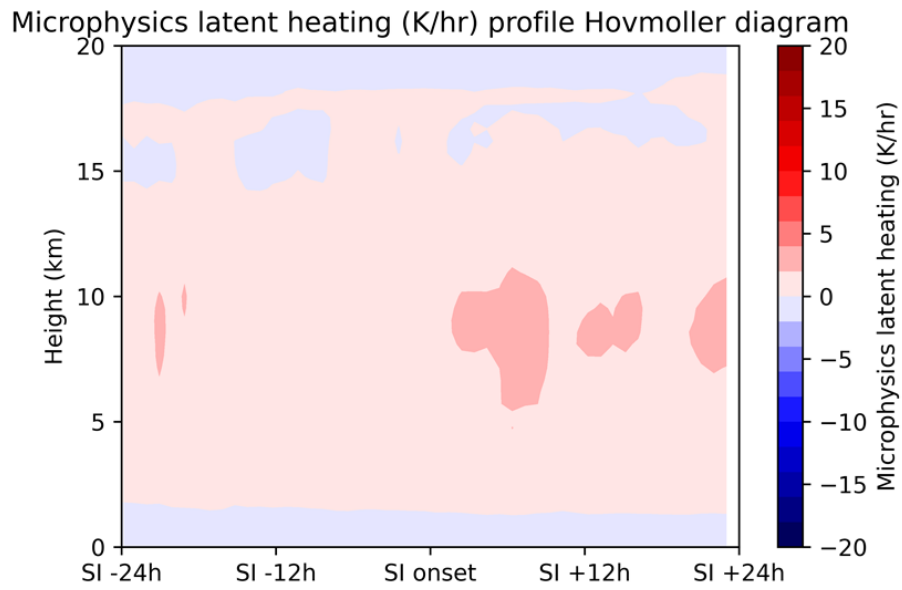


(c)

圖 4-15 WRF 模式暖雲實驗組 SI 個案珊珊颱風(2021)之軸對稱平均 RWC。X 軸表與颱風中心之距離(以 RMW 為單位)，Y 軸表高度。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。



(a)



(b)

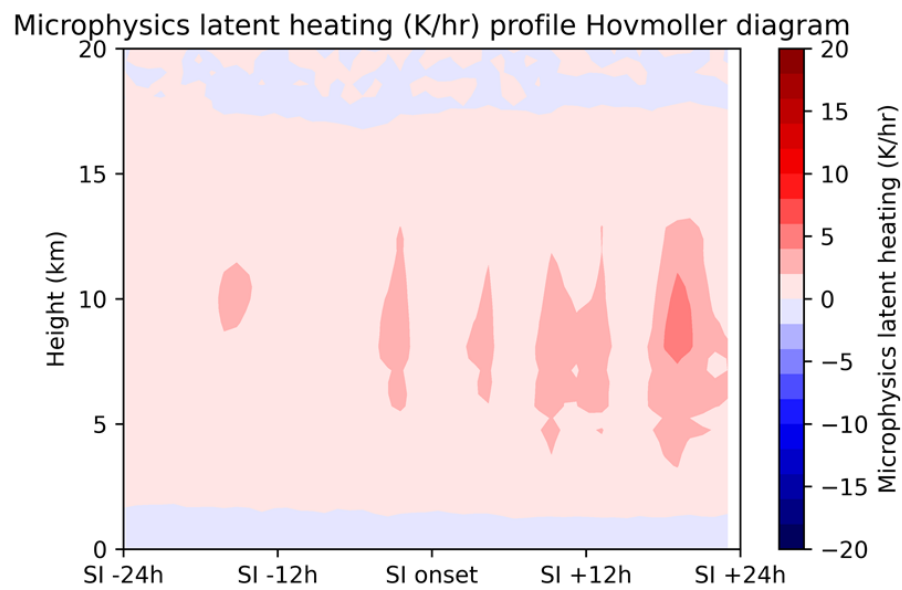


圖 4-16 SI 個案珊珊颱風(2018)潛熱加熱量值取 3RMW 內平均後之哈默圖。X 軸表相對 SI 發生的時間，時間序由左至右，Y 軸則表高度。(a)Kessler scheme、(b)WSM6 scheme。

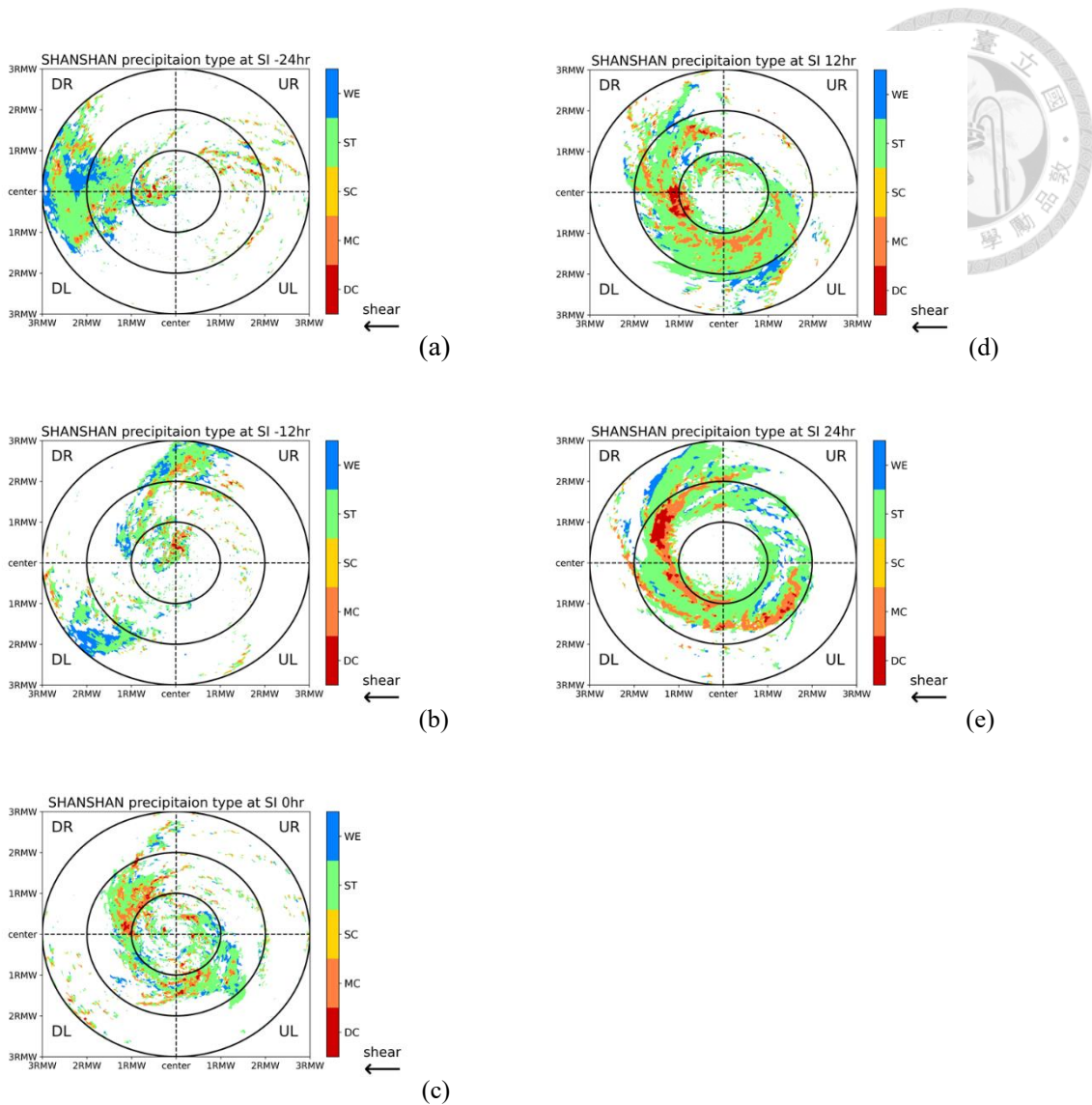


圖 4-17 WRF 模式暖雲實驗組 SI 個案珊珊颱風(2018)之降水類型。黑色虛線用以區分不同象限範圍，同心圓內圈為 1 倍 RMW，中間圓圈則為 2 倍 RMW，最外圈則為 3 倍 RMW。(a)SI 前 24 小時、(b)SI 前 12 小時、(c)SI 開始、(d)SI 後 12 小時、(e)SI 後 24 小時。

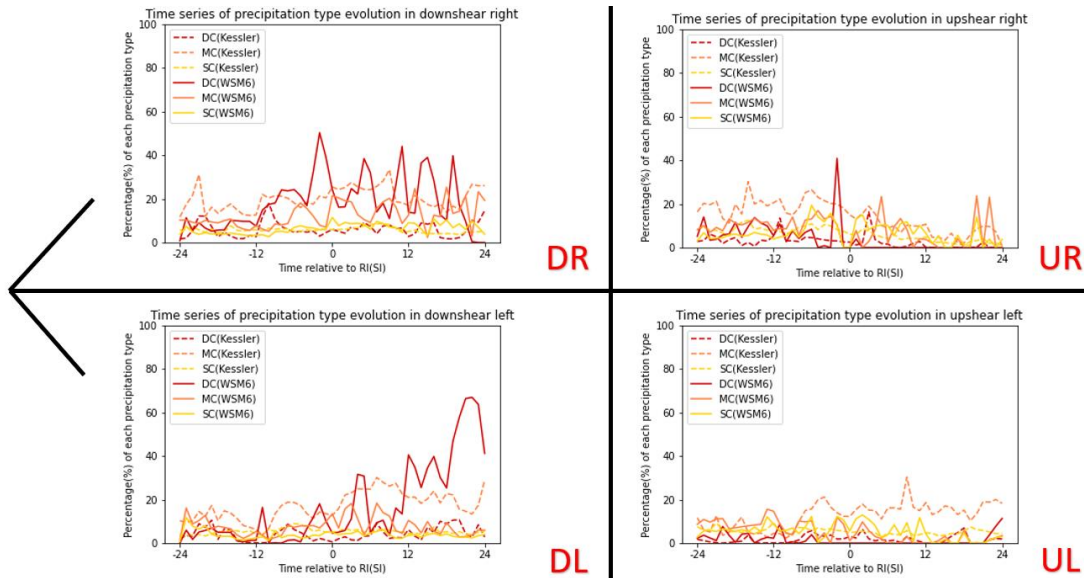


圖 4-18 SI 個案珊珊颱風(2018)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 SI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總降水格點之比例。深紅實線表控制組 DC 比例，橘色實線表控制組 MC 比例，黃色實線表控制組 SC 比例，深紅虛線表暖雲實驗組 DC 比例，橘色虛線表暖雲實驗組 MC 比例，黃色虛線表暖雲實驗組 SC 比例。

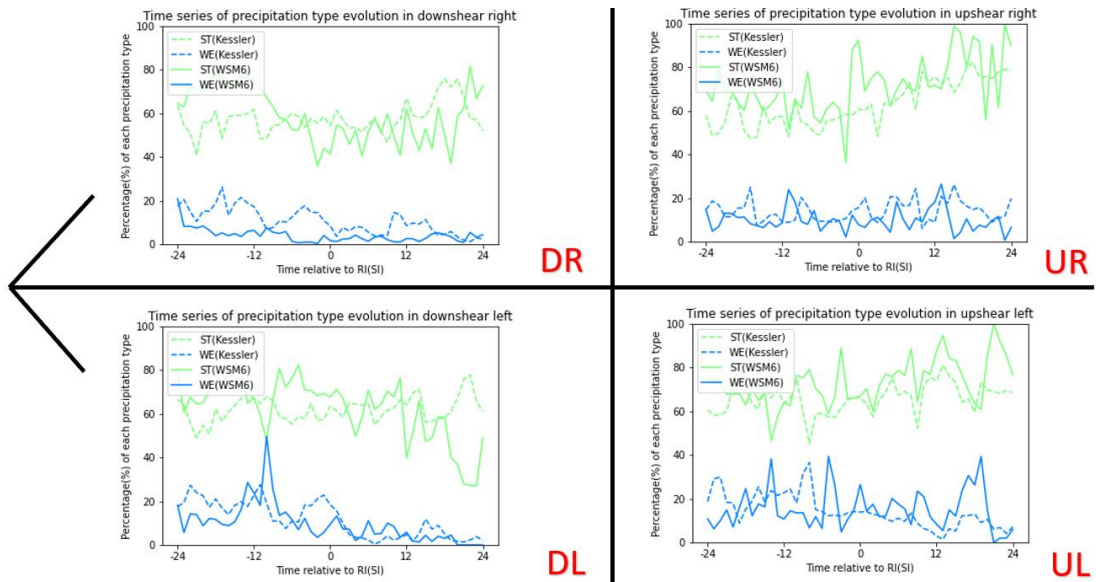


圖 4-19 SI 個案珊珊颱風(2018)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 SI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總降水格點之比例。綠實線表控制組 ST 比例，藍色實線表控制組 WE 比例，綠虛線表暖雲實驗組 ST 比例，藍色虛線表暖雲實驗組 WE 比例。

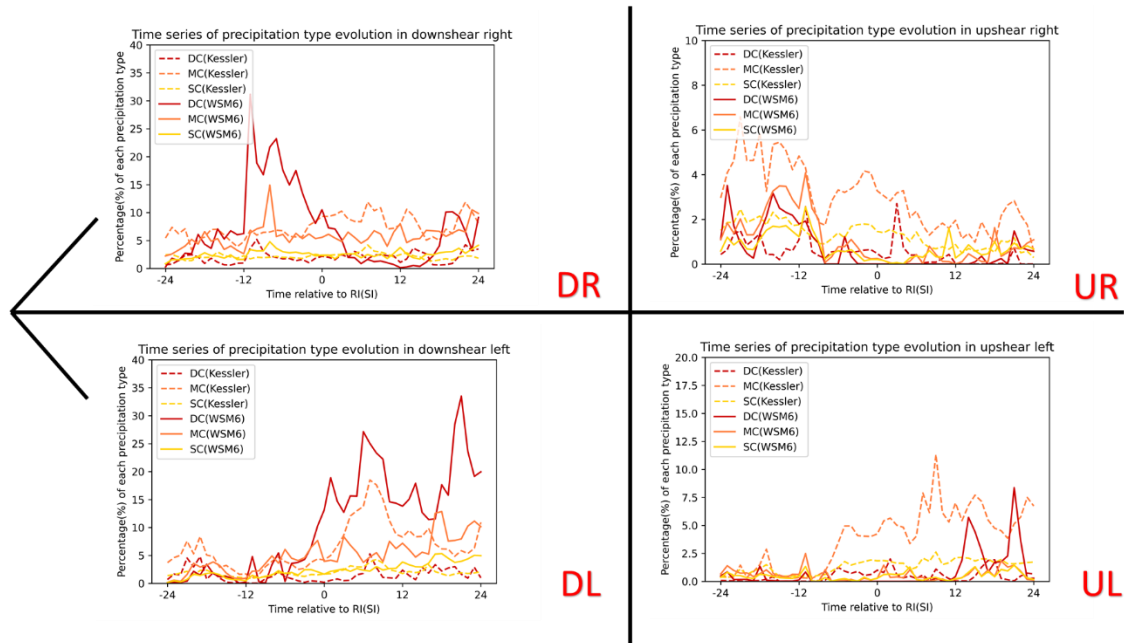


圖 4-20 SI 個案珊珊颱風(2018)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 SI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。深紅實線表控制組 DC 比例，橘色實線表控制組 MC 比例，黃色實線表控制組 SC 比例，深紅虛線表暖雲實驗組 DC 比例，橘色虛線表暖雲實驗組 MC 比例，黃色虛線表暖雲實驗組 SC 比例。

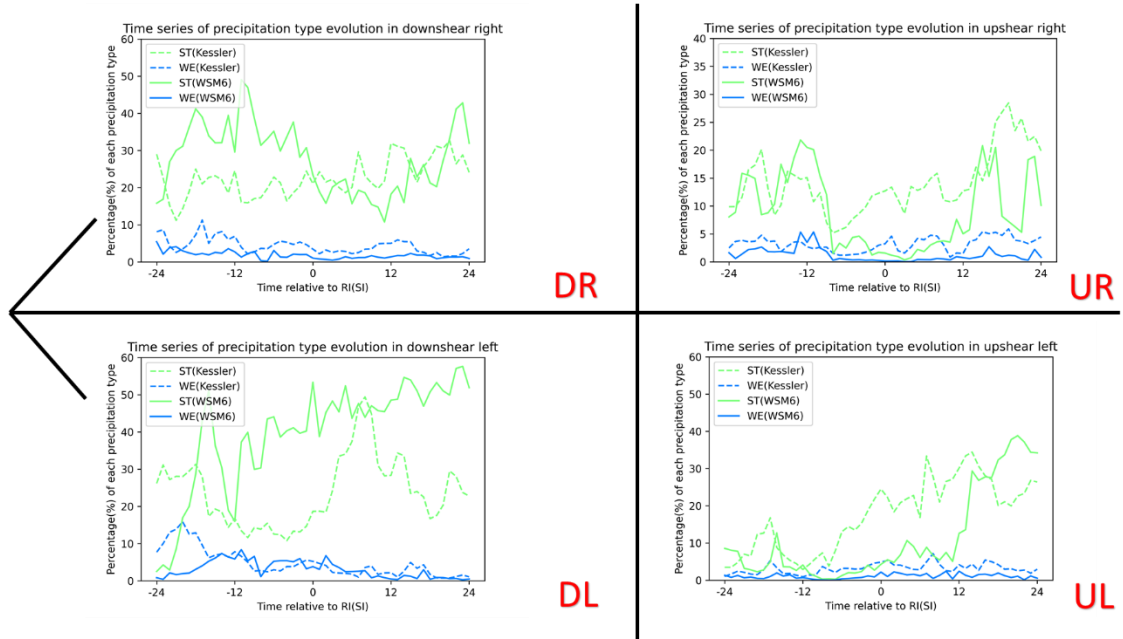


圖 4-21 SI 個案珊珊颱風(2018)降雨類型比例時序圖。左上圖表 DR 象限，右上表 UR 象限，左下表 DL 象限，右下則表 UL 象限。X 軸表相對 RI 開始之時序，Y 軸表各類型降水分別占該象限總格點之比例。綠實線表控制組 ST 比例，藍色實線表控制組 WE 比例，綠虛線表暖雲實驗組 ST 比例，藍色虛線表暖雲實驗組 WE 比例。

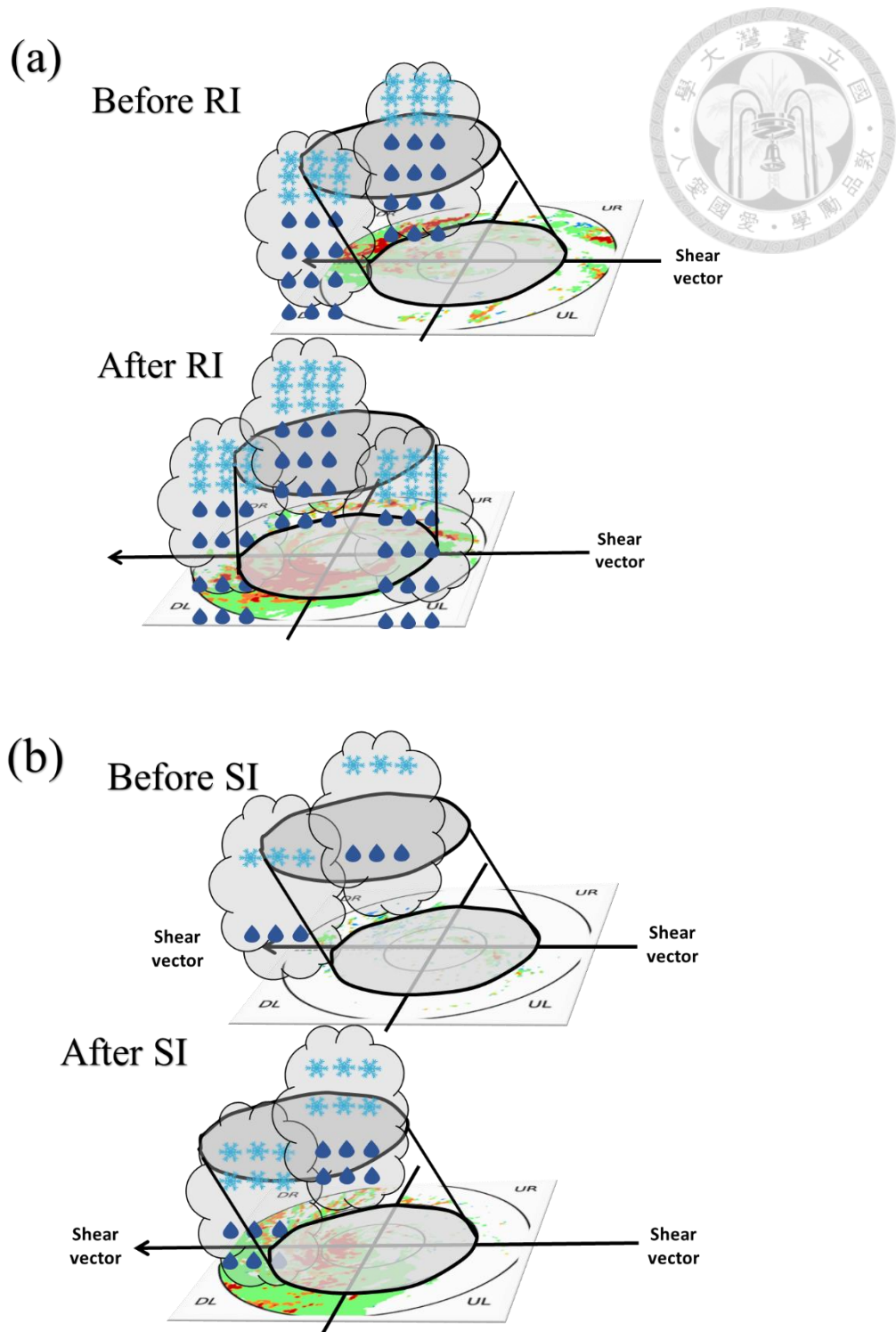


圖 5-1 RI 與 SI 颱風雲微物理參數及降水類型概念模式圖。(a)RI 前後對照、(b)SI 前後對照。