

國立臺灣大學理學院大氣科學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Atmospheric Science

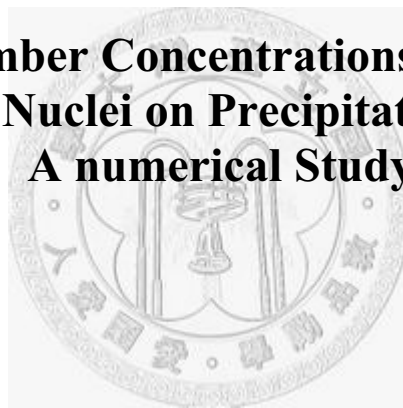
College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

凝結核與冰核數量濃度對降水影響之數值研究

**Effect of the Number Concentrations of Condensation
Nuclei and Ice Nuclei on Precipitation Formation:
A numerical Study**



陳薏蘋

Yi-Pin Chen

指導教授：陳正平 博士

Advisor: Jen-Ping Chen, Ph.D.

中華民國 97 年 6 月

June, 2008

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

本論文係 陳慧蘋 君 (學號 R95229010) 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 97 年 6 月 25 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：

陳正平

(簽名)

(指導教授)

楊明仁

王寶貴

劉紹臣

洪惠敏

系主任、所長

陳正平

(簽名)

誌謝

研究生生活轉眼間就要告一段落了，這兩年在台大的學習，將是我一生美好的回憶。感謝父母栽培，我才能有今日的成就；感謝求學過程中遇到的好老師們，因為您們的指導，使我建立正確的人生觀，可以積極面對人生的挑戰。

在此要特別感謝指導教授——陳正平博士，謝謝您這兩年的悉心指導；謝謝您耐心的聆聽我的問題；謝謝您不厭其煩的指正論文上的謬誤。真的感到很慶幸能接受您的指導，感謝您開闊我的科學視野，引領我更加瞭解大氣科學的迷人之處。

感謝雲與氣膠實驗室的每一位成員，謝謝大家提供的資料與模式的指導，讓對電腦程式陌生的我能順利上手；謝謝大家的照顧與關懷，讓我得以適應研究生生活。謝謝志遠、Anupam、鄭大哥、筱平、大姐、乾忠學長、湘鶴、佩耘、宜菽、翊歲、皮皮、力力、境芸、心怡、、、等，感謝你們的提攜與協助，因為有你們的參與讓我的研究生生活得以充滿歡笑。

謝謝 Anne 這兩年來毫無怨言的承接我的負面情緒，讓我得以抒發不滿心情與遭遇挫折的無力感，感恩妳的聆聽與鼓勵，讓我能振作精神重新面對研究工作上的種種問題。

再次感謝父母、師長、朋友們在各方面的支持與關懷，讓我的碩士論文得以順利完成。印度詩人泰戈爾曾說過：「人生猶如一本畫冊，內容如何，端看個人如何描繪。」謝謝每一位陪伴我渡過美好時光的人們，在我的人生畫冊裡留下動人顏料，使我的人生畫冊充滿繽紛色彩。

摘要

水是人類生活不可或缺的生活要素之一，人類可用水的來源主要來自降水，而探制降水效率的重要關鍵之一為大氣中 CCN(Cloud Condensation Nuclei)和 IN (Ice Nuclei)的數量濃度。CCN 和 IN 的來源主要為空氣中的懸浮微粒，即是所謂的氣膠。近年來有許多研究著重於 CCN 和 IN 對降水的影響，有的研究指出增加 CCN 或 IN 有助於降水的形成；但有的些研究結果則否。由於氣膠與雲內動力效應的交互作用的影響相當複雜，再加上對冰相過程的作用所知有限，因此目前對於 CCN 和 IN 對降水的影響為何仍未有確切的定論。

故本研究重點將著重在 CCN、IN 數量濃度的變化對降水的影響。使用的模式為加入 C&L-Reisner 2 參數法 (CLR 參數法) 的 MM5(The Fifth-Generation NCAR/PSU Mesoscale Model)。CLR 參數法是結合 Chen and Liu (2004)之 C&L 暖雲參數法與 MM5 中的 Reisner 2 冰相過程的參數法，可反映凝結核的數量濃度與氣膠粒徑分佈對暖雲與冷雲過程的影響。

目前選定兩個鋒面個案進行模擬，透過一系列的模擬測試可知，增加或減少氣膠的數量濃度對不同的天氣型態降雨會有不同的影響，在深對流系統的個案裡增加氣膠數量濃度會增加降雨，但對於對流系統較淺的個案而言則是相反的結果，顯示氣膠的數量濃度對降水過程有其重要但非線性的影響。

關鍵字: CCN、IN、氣膠、降水、CLR 參數法

Abstract

Humans cannot live without water. Due to the influence of increasing populations and degree of industrialization on global climate and environment, human influence on precipitation efficiency became a very important issue. Precipitation is one of the most basic commodities on earth sustaining human life. Its efficiency is strongly influence by aerosol particles that serve as cloud condensation nuclei (CCN) and ice nuclei (IN).

Some past studies indicated that more aerosols may result in more but smaller cloud drops. Smaller cloud drops would suppresses drop coalescence thus inhibit precipitation formation. But there are also studies that shown otherwise. The aerosol effect on clouds remains an unsolved issue and the processes involved are complicated and nonlinear.

The main motivation of this study is to gain a better understanding of the mechanisms involved in this aerosol-cloud interaction, using a non-hydrostatic mesoscale cloud model (MM5) as the main tool. A C&L Reisner 2 scheme that considers the effects of CCN on precipitation is incorporated into this model. The simulation results indicated that different concentration of aerosols has different effect on precipitation depending on the types of cloud system. More aerosols generally produce more and smaller cloud drops and inhibit warm rain formation; it also enhances the deposition growth of ice particles but limits their growth by riming. In the deep convective cloud system that simulated here, increasing aerosol can enhance surface rainfall; but for the shallow convective cloud system the surface precipitation is reduced. Increasing IN not necessary increase or decrease precipitation, and the effect actually depends on the strength of

homogeneous nucleation and other nucleation processes. Overall, aerosols play complicated and nonlinear roles in precipitation process.

Keywords: CCN 、 IN 、 aerosol 、 precipitation 、 CLR-scheme



目 錄

口試委員會審定書	i
誌謝	ii
中文摘要	iii
英文摘要	iv
目錄	vi
表目錄	viii
圖目錄	ix
第一章 前言	1
第二章 模式應用	4
2.1 MM5 模式簡介	4
2.2 雲微物理參數法	5
2.2.1 Reisner2 參數法	6
2.2.2 C&L 參數法	6
2.2.3 C&L Reisner2 參數法	8
2.3 冰核數量與核化速率	9
第三章 實驗設計	11
3.1 模式設定	11
3.2 模擬個案介紹	11
3.2.1 2000 年 2 月 20 日氣象場分析	12
3.2.2 2003 年 5 月 16 日氣象場分析	12
3.3 實驗設計	13
第四章 模擬結果	15
4.1 CCN 影響 2000/02/20 個案	15

4.2 IN 影響 2000/02/20 個案	17
4.3 CCN 影響 2003/05/16 個案	19
4.4 IN 影響 2003/05/16 個案	21
第五章 結論	23
參考文獻	25
圖表	30
附錄 A：實驗一模擬結果補充	104
附錄 B：實驗二模擬結果	107
附錄 C：實驗三模擬結果	110
附錄 D：實驗四模擬結果	113



表 目 錄

表3.1	背景氣膠的數量、平均粒子大小和幾何寬度	30
表3.2	CCN和IN數量濃度設定簡表	30
表3.3	CCN和IN數量濃度設定簡表	30



圖目錄

圖 2.1	MM5 模式架構圖	31
圖 2.2	MM5 各種參數法關係圖	31
圖 2.3	C&L Scheme 中混合比和數量濃度所交互影響之物理過程 ...	31
圖 2.4	三模對數常態粒徑分布圖	32
圖 3.1	MM5 模式 4 巢所涵蓋範圍	32
圖 3.2	2000/02/20 日本氣象廳綜觀地面天氣圖	33
圖 3.3	2000/02/20 紅外線色調強化圖	34
圖 3.4	2000/02/20 自動雨量觀測站所得 48 小時地面累積雨量圖	35
圖 3.5	2000/02/20 自動雨量觀測站 48 小時累積雨量圖	35
圖 3.6	2003/05/16 日本氣象廳綜觀地面天氣圖	36
圖 3.7	2003/05/16 紅外線色調強化圖	37
圖 3.8	2003/05/16 自動雨量觀測站所得 48 小時地面累積雨量圖	38
圖 3.9	2003/05/16 自動雨量觀測站 48 小時累積雨量圖	38
圖 3.10	中央氣象局色調強化圖說明	39
圖 3.11	實驗設計簡圖	39
圖 4.1	【實驗一】模擬出之 48 小時累積降雨量圖	40
圖 4.2	2000/02/20 平均溫度模擬結果	40
圖 4.3	【實驗一】雲水混合比隨時間、高度變化之模擬結果	41
圖 4.4	【實驗一】雲滴數量濃度隨時間、高度變化之結果	42
圖 4.5	【實驗一】雲滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果	43
圖 4.6	【實驗一】雨水混合比隨時間、高度變化之結果	44
圖 4.7	【實驗一】雨滴數量濃度隨時間、高度變化之結果	45
圖 4.8	【實驗一】雨滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果	46
圖 4.9	【實驗一】雲冰混合比隨時間、高度變化之結果	47

圖4.10	【實驗一】冰晶的數量濃度隨時間、高度變化之結果	48
圖4.11	【實驗一】雲冰生長率垂直分布圖	49
圖4.12	【實驗一】雪混合比隨時間、高度變化之結果	50
圖4.13	【實驗一】雹混合比隨時間、高度變化之結果	51
圖4.14	【實驗一】雪和雹生長率垂直分布圖	52
圖4.15	【實驗一】雪融化率垂直分布圖	53
圖4.16	【實驗一】雹融化率垂直分布圖	54
圖4.17	【實驗一】2000/02/20風速出現的次數圖	55
圖4.18	【實驗一】2000/02/20風速出現次數距平圖	55
圖4.19	【實驗二】模擬出之48小時累積降雨量圖	56
圖4.20	【實驗二】整層雲水厚度和整層雨水厚度	56
圖4.21	【實驗二】雲水混合比隨時間、高度變化之模擬結果	57
圖4.22	【實驗二】雲滴數量濃度隨時間、高度變化之結果	58
圖4.23	【實驗二】雲滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果	59
圖4.24	【實驗二】雨水混合比隨時間、高度變化之結果	60
圖4.25	【實驗二】雨滴數量濃度隨時間、高度變化之結果	61
圖4.26	【實驗二】雨滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果	62
圖4.27	【實驗二】雲冰混合比隨時間、高度變化之結果	63
圖4.28	【實驗二】冰晶的數量濃度隨時間、高度變化之結果	64
圖4.29	【實驗二】雲冰生長率垂直分布圖	65
圖4.30	【實驗二】雪混合比隨時間、高度變化之結果	66
圖4.31	【實驗二】雹混合比隨時間、高度變化之結果	67
圖4.32	【實驗二】雪和雹生長率垂直分布圖	68
圖4.33	【實驗二】雪融化率垂直分布圖	69
圖4.34	【實驗二】雹融化率垂直分布圖	70

圖4.35	【實驗二】2000/02/20風速出現的次數圖	71
圖4.36	【實驗二】2000/02/20風速出現次數距平圖	71
圖4.37	【實驗三】模擬出之48小時累積降雨量圖	72
圖4.38	2003/05/16平均溫度模擬結果	72
圖4.39	【實驗三】雲水混合比隨時間、高度變化之模擬結果	73
圖4.40	【實驗三】雲滴數量濃度隨時間、高度變化之結果	74
圖4.41	【實驗三】雲滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果	75
圖4.42	【實驗三】雨水混合比隨時間、高度變化之結果	76
圖4.43	【實驗三】雨滴數量濃度隨時間、高度變化之結果	77
圖4.44	【實驗三】雨滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果	78
圖4.45	【實驗三】雲冰混合比隨時間、高度變化之結果	79
圖4.46	【實驗三】冰晶的數量濃度隨時間、高度變化之結果	80
圖4.47	【實驗三】雲冰生長率垂直分布圖	81
圖4.48	【實驗三】雪混合比隨時間、高度變化之結果	82
圖4.49	【實驗三】雹混合比隨時間、高度變化之結果	83
圖4.50	【實驗三】雪和雹生長率垂直分布圖	84
圖4.51	【實驗三】雪融化率垂直分布圖	85
圖4.52	【實驗三】雹融化率垂直分布圖	86
圖4.53	【實驗三】200305/16風速出現的次數圖	87
圖4.54	【實驗三】2003/05/16風速出現次數距平圖	87
圖4.55	【實驗四】模擬出之48小時累積降雨量圖	88
圖4.56	【實驗四】整層雲水厚度和整層雨水厚度	88
圖4.57	【實驗四】雲水混合比隨時間、高度變化之模擬結果	89
圖4.58	【實驗四】雲滴數量濃度隨時間、高度變化之結果	90
圖4.59	【實驗四】雲滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果	91

圖4.60	【實驗四】雨水混合比隨時間、高度變化之結果	92
圖4.61	【實驗四】雨滴數量濃度隨時間、高度變化之結果	93
圖4.62	【實驗四】雨滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果	94
圖4.63	【實驗四】雲冰混合比隨時間、高度變化之結果	95
圖4.64	【實驗四】冰晶的數量濃度隨時間、高度變化之結果	96
圖4.65	【實驗四】雲冰生長率垂直分布圖	97
圖4.66	【實驗四】雪混合比隨時間、高度變化之結果	98
圖4.67	【實驗四】雹混合比隨時間、高度變化之結果	99
圖4.68	【實驗四】雪和雹生長率垂直分布圖	100
圖4.69	【實驗四】雪融化率垂直分布圖	101
圖4.70	【實驗四】雹融化率垂直分布圖	102
圖4.71	【實驗四】2000/02/20風速出現的次數圖	103
圖4.72	【實驗四】2000/02/20風速出現次數距平圖	103
圖A.1	【實驗一】24小時累積降雨量模擬結果	104
圖A.2	【實驗一】個案平均溫度模擬結果	105
圖A.3	【實驗一】總冰相粒子混合比隨時間、高度變化之模擬結果 ...	106
圖B.1	【實驗二】24小時累積降雨量模擬結果	107
圖B.2	【實驗二】個案平均溫度模擬結果	108
圖B.3	【實驗三】總冰相粒子混合比隨時間、高度變化之模擬結果 ...	109
圖C.1	【實驗三】24小時累積降雨量模擬結果	110
圖C.2	【實驗三】個案平均溫度模擬結果	111
圖C.3	【實驗三】個案平均溫度模擬結果	112
圖D.1	【實驗四】24小時累積降雨量模擬結果	113
圖D.2	【實驗四】個案平均溫度模擬結果	114
圖D.3	【實驗四】個案平均溫度模擬結果	115

一、前言

水是孕育萬物的生命之母。世界古文明大多起源於大河流域，從古至今人類的文明生活發展就一直和水資源息息相關。雖然覆蓋地球的水體約佔 70%，但人類實際可用的淡水資源卻僅僅只有 3%而已。缺水問題一直是目前各個城市面臨的首要問題之一，因此水資源的相關議題一直不容小覷。

淡水資源主要可分為地表水和地下水，但是最主要的來源仍是來自於天空雲中的降水，而這當中 Cloud Condensation Nuclei (CCN)和 Ice Nuclei (IN)的數量濃度則是影響降水的重要關鍵之一。CCN 和 IN 都是所謂的氣膠(aerosol)。在適當的溫度及濕度下，不同氣膠的物理化學特性與環境的相互配合作用，可決定氣膠是作為 CCN、IN 或同時作為 CCN 與 IN。研究指出氣膠的濃度多寡攸關雲滴粒徑大小分布、降水過程、雲頂高度、雲層厚度發展、閃電的發生…等，對雲微物理過程、動力過程以及對流雲內粒子的帶電機制有很大的影響(Rosenfeld et al., 2000a；Orville et al., 2001；Williams et al., 2002；Khain et al., 2005)。

氣膠對降水過程的影響可大致區分為暖雲降水和冷雲降水兩種型態。一些關於暖雲降水過程的研究指出，若 CCN 的數量濃度愈高，產生的小雲滴較多，進而增加雲的反照率、使雲的生命期變長，同時也使降水減少或延後降水時間(Twomey, 1977；Albrecht, 1989；Liou et al., 1989；Kogan, 1991；Flossmann, 1998；Zhang et al., 2006；Cheng et al., 2007a)。一些種雲實驗(Mather et al. 1997, Cooper et al. 1997)也指出，在夏季對流雲底燃燒焰劑產生大於 $0.3\mu\text{m}$ 直徑的巨核(giant CCN; GCCN)，可加速雲的成長並且影響初始的凝結過程，GCCN 會先活化成雲滴，增加合併機會進而形成雨，也會抑制背景 CCN 的活化，使雲滴的數量減少，因而使已活化

的雲滴可長得更大，並且能夠增加和其他雲滴碰撞結合而成長的機會，使降雨提前發生。Teller and Levin (2006)與 Zhang et al. (2006)也指出巨核的存在有助於降雨的產生，但只有在 CCN 和 GCCN 兩者濃度都很高時其效果才明顯。

隨著工業的發展迅速污染日趨嚴重，空氣污染造成氣膠數量濃度的增加對降雨的影響也日趨嚴重(Rosenfeld et al., 2000b, 2002, 2006)。Rosenfeld 等人的研究認為人為污染產生的氣膠會抑制對流雲發展和影響地形雨的降水過程，由觀察也得知當污染雲移至海邊時，空汙氣膠的影響會變小，這是因為海鹽氣膠為良好的 GCCN 來源，可以收集污染雲內的小雲滴形成雨滴降雨，透過雨除過程來淨化空氣。而 Van Den Heever et al. (2007)則指出都會區的對流系統會因 CCN 及 GCCN 數量濃度的增加而加強對流，使降雨提前發生、降雨量增加，並且產生較多的冰；若只有增加 CCN 的數量濃度，最初降雨發生的時間會延遲並減少降水量，但透過對冰相過程的影響，最後的累積降雨量和對流加強的強度效應卻大於增加 GCCN 的狀況。

在冷雲降水型態中，冰晶的形成扮演相當重要的角色。通常形成一個水滴需要一個 CCN，因此雲中雲滴的數目與 CCN 的數量濃度大致相當，但冰晶的情況卻有所不同，由於高空具有低溫與高過飽和度的優勢條件，不論是異質核化或同質核化都具有較高的核化速率，所以冰晶的數量並不一定和 IN 的數量濃度相當。由於異質核化可以提供下墊面降低核化障礙，因此所需能量較同質核化低，較易核化成冰晶，故一般認為 IN 的數量濃度愈高愈有利冰晶形成，對降水愈有利，但也需配合環境具有低溫或高過飽和度的條件。

Van Den Heever et al. (2006)指出，增加 IN 的數量濃度有助於產生降水；但是 Teller and Levin (2006)卻指出增加 IN 數量濃度反而會使地面降水減少，而且在乾淨雲內加入 IN 的減少降水現象會較污染雲來得明顯。

綜合諸多學者的研究結果可知 CCN 與 IN 對降水的影響十分複雜；由於

對複雜的冰相過程所知有限，因此增加 CCN 和 IN 的淨效應為何，目前尚未有確切的答案。故本研究重點將著重在 CCN、IN 數量濃度的變化對降水的影響，藉由模式的模擬與分析，討論 CCN 與 IN 數量濃度變化的相對關係。



二、模式應用

本研究之目的主要在探討雲凝結核(CCN)數量濃度與冰核(IN)數量濃度對降水變化所產生的影響。在氣象模擬上採用的數值模式為發展成熟的中尺度氣象模式(The fifth-Generation NCAR/PSU Mesoscale Model；MM5)；雲微物理參數法則使用 C&L-Reisner 2(CLR)參數。CLR 參數法是結合 Chen and Liu (2004)之 C&L 暖雲參數法與 MM5 中的 Reisner 2 冰相過程的參數法，可反映凝結核的數量濃度與氣膠粒徑分佈對冰態過程的影響。冰核核化速率則是根據 Huffman (1973)的結果修改 Resiner2 之冰核核化關係式，氣膠型態及粒徑分佈則以 Whitby(1978)的分析結果為主，來進行 CCN 與 IN 數量濃度變化的模擬實驗。本章將分別就所使用的 MM5 模式、參數法、核化速率進行簡介。

2.1 MM5 模式簡介

MM5 數值模式是由美國賓州州立大學和美國國家大氣科學研究中心共同開發的三維空間中尺度靜力/非靜力數值模式，最早是由 Anthes and Warner (1978)根據原始方程式裡中尺度的運動特性，將其簡化後所建立起來的數值模式。經過不斷的編修，目前 MM5 模式已開發至第三版，第三版具備自動依據模擬網域大小來判別使用靜力或是非靜力系統模擬的能力，採用追隨地勢座標(Sigma 座標)，並具備多重巢狀網格與四維同化資料融入(FDDA, Four Dimensional Data Assimilations)的功能。本研究使用的 MM5 模式主要為 3.4 版。

MM5 模式是由許多輔助程式所構成，整體模組架構如圖 2.1 所示。其中 TERRAIN、REGRID、RAWINS/litte_r 及 INTERP 模組為資料前置處理

系統，目的在建立模式所需的初始場和邊界條件。本研究所使用的前置處理系統以 TERRAIN、REGRID 及 INTERP 為主，MM5 則為模擬主系統，依據 INTERP 所產生的資料進行時間積分運算。

前置處理系統的功用，主要是先利用 TERRAIN 模組決定地圖投影方式，訂定出所要模擬的區域範圍，並依使用者的選擇，將地形、地貌等資訊內插至模式網格點資料。經由 TERRAIN 產生基本的地表資料後，再利用 REGRID 模組將網格分析場資料水平內插至由 TERRAIN 所產生的解析度較高的模式網格上。INTERP 模組則是將來自 REGRID 模組的資料，把氣壓座標資料線性內插至模式所要使用的 Sigma(σ)座標上，經過初始化進一步產生模式初始場和邊界資料後再進入 MM5 主程式進行模擬。時間積分完畢後可產生一組適用於 MM5 模式的初始場、側邊界與底邊界條件，再利用 GrADS、NCAR、RIP、等繪圖應用程式進行參數變量繪圖，以利分析比對。

在大氣複雜的運動過程中，有許多物理過程無法具體表達出來，不同的天氣系統所需考量的要素也不盡相同，因此 MM5 模式可針對不同大氣物理過程，加入不同的物理參數法以因應模擬的需求，透過參數化的方法來模擬這些物理現象，參數法包括雲微物理參數法、積雲參數法、邊界層參數法、輻射參數法、地表收支參數法等。由圖 2.2 可以看出模式的參數法與參數法之間並非獨立運作，而是彼此交互影響。下一節所要介紹的便是這次研究所使用的雲微物理參數法。

2.2 雲微物理參數法

雲微物理參數法主要用來討論各種水氣的各種形態，例如雲水、雨水、冰晶、過冷水、雪、冰雹等。不同的雲微物理參數法，著重的雲微物

理處理過程有所不同，所以各有不同的運算處理方式，在數值模擬上也會造成模擬結果的差異。在此選擇結合 Reisner 2 參數法和 C&L 參數法的 C&L-Reisner 2 參數法(簡稱為 CLR 參數法)做為 MM5 氣象模式中的雲微物理機制。下面將分別對 Reisner 2 參數法、C&L 參數法和 CLR 參數法進行簡介。

2.2.1 Reisner 2 參數法

Reisner 2 參數法是 MM5 模式原有的參數法，由 Resiner 等人在 1998 年提出，可以直接計算水氣、雲水、雨水、冰晶、雪及軟雹等六種水相粒子的混合相雲物理參數法。其物理過程包括冰的核化、增殖、凝華、蒸發、融化、淞化，以及雨滴凍結、雲滴同質及異質凍結等。Reisner 2 參數法的預報方程，可以模擬出雲水、雨水、冰晶、雪、軟雹的質量混合比，也可針對冰晶數量濃度進行預報，為具有較完整的冰相處理過程的參數法。雖然冰雹與軟雹在密度上有所不同，但為模式設計簡單起見將兩者的密度視為相同(王，1994)，所以在此僅預報軟雹並將軟雹分布視為近似冰雹。

Reisner 2 參數法是以馬帕分布(Marshall-Palmer distribution)來描述所有的降雨類型的粒徑分布，由於馬帕分布是根據大量的實際觀測資料的平均值所制定出來的經驗式，所以有時會與實際分布出入甚大，因此雖然 Reisner 2 參數法的方程式較為簡單，可以節省計算時間，但對於那些粒徑分布敏感的過程而言，具有較高的不確定性。

2.2.2 C&L 參數法

C&L 參數法則是依據 Chen and Lamb (1994)的詳盡雲微物模式模擬的

結果經物理理論分析與統計分析而來。Chen and Lamb (1994)的詳盡雲微物理模式是以細格法(bin method)將雲粒子的多種化學成分和物理特性加以分類，可以同時計算氣膠與雲粒子所含的水分、溶質和其它性質的變化，並且可以描述雲滴活化過程、計算雲內過飽和度、雲滴數量濃度隨凝結核數量濃度多寡的分佈。模式考慮的雲微物過程包含氣膠的活化過程、雲滴和雨滴的凝結成長，以及液滴間的碰撞合併與碎裂。

C&L 參數法主要針對暖雲過程，根據 Chen and Lamb (1994)的詳盡雲微物模式的分析模擬結果，利用總體參數式來表示雲滴、雨滴的質量混合比和數量濃度的變化率(Chen and Liu, 2004)，著重的雲微物理過程如圖 2.3 所示。除此之外亦提供診斷方程來計算終端速度、有效半徑、雷達回波因子等。

此參數法根據柯勒理論(Köhler theory)來詳細處理氣膠活化為雲滴的過程，根據環境過飽和度(SS)而計算出氣膠可被活化的最小乾半徑(r_{act})，其間的關係可表達為下式

$$r_{act} \propto SS^{-2/3} \quad (2-1)$$

不過 MM5 並不容許過飽和發生；為能模擬氣膠活化為雲滴的機制，Cheng et al. (2007)修改 MM5 模式為能容許過飽和度的產生，如此一來氣膠活化成雲滴的數量濃度即可依據粒徑分布和成分而得知，而活化的雲滴初始大小亦可由 Chen and Liu (2004)的診斷方程計算得知。除此之外也考慮雲滴和雨滴受蒸發影響而去活化轉變回氣膠的機制。另一個特色是當乾氣膠的粒徑大小大於門檻值時，氣膠可以直接活化成雨胚。

目前的應用裡，氣膠的化學成份都假設為硫酸氨，粒徑分布則是三模對數常態分布(tri-modal lognormal aerosol size distribution)，可表達為下式

$$n_a(r) = \sum_{i=1}^3 \frac{N_{0,i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\left(\frac{\ln r - \ln \bar{r}_i}{\sqrt{2}\sigma_i}\right)^2\right] \quad (2-2)$$

圖 2.4 即是 Cheng et al. (2007a)根據上式所繪之三模對數常態分布圖。由於

尚未考慮氣膠演化機制，因此無法任氣膠粒徑分佈進行演化，故現階段先此假設粒徑分布型態不隨時間而變，三模分布的外形大致維持一致。模式需追蹤 $r_{act,now}$ 、 $r_{act,past}$ 兩個截斷半徑， $r_{act,now}$ 是現在的截斷半徑， $r_{act,past}$ 為過去時間內的最低截斷半徑；當 $r_{act,now} < r_{act,past}$ 則在這粒徑間的氣膠將被活化成雲滴或雨胚； $r_{act,now} > r_{act,past}$ 則代表過飽和度不足以再活化更小的氣膠，不會有新的雲滴或雨胚產生。

2.2.3 CLR 參數法

為能描述冷雲降水過程，Cheng et al. (2007b) 結合 Reisner 2 參數法和 CL 參數法，成立一個新的雲微物理過程參數法即為 CL-Reisner 2 參數法(簡稱為 CLR 參數法)。

CLR 參數法做了若干修正使暖雲參數法與冷雲參數法能真正契合，採用 DeMott et al. (1990) 的實驗結果所得到同質凍結核化速度取代原本的核化速度。此外，原參數法中的初始冰晶過大，在核化速率很高時會造成數值不穩定，故將質量由 1×10^{-12} 公斤更改為的 3.27×10^{-14} 公斤。Reisner 2 參數法是應用馬帕分布來描述所以類型的降雨，然而雨滴大小的分布截距和斜率是根據數量濃度和質量混合比來，且雨水和雨滴數量的來源可能是由雪花融解而來；原始的 Reisner 2 參數法在這部份的處理過程稍有不足，會使融化所形成的雨滴數量過於高估，因此 CLR 參數法在此採用 Ryan (2000) 的經驗式來改善此一問題。而原 Reisner 2 參數法中雪或冰雹經碰撞收集雲滴的 accretion 效率雖是雲滴大小的參數，但其暖雲參數法並不考慮雲滴大小，只能假設為定值；而 CL 參數法則實際提供雲滴大小，因此 accretion 過程現在可以反映 CCN 數量對雲滴大小的影響。

由上述說明可知，結合 Reisner 2 參數法和 CL 參數法的 CLR 參數法，

具有此兩種參數法的優點，可反映凝結核的數量濃度與氣膠粒徑分佈對冰態過程的影響，所以較能真實反映 IN 和 CCN 數量濃度對降雨的影響。

2.3 冰核數量與核化速率

原始 Reisner 2 參數法的冰核核化速率參數法是採用 Fletcher(1962)所提出的關係式來計算冰核數量濃度。Fletcher 認為凝華核化的冰晶數量濃度只與環境溫度有關，以下述經驗式表示：

$$N = n_0 \cdot \exp(\beta \cdot \Delta T) \quad (2.3)$$

其中 N 為核化後的有效冰晶數量濃度， n_0 為初始冰晶數量濃度， β 為常數， ΔT 則為過冷度 ($\Delta T \equiv 273.15^\circ\text{C} - T$)。但 Huffman 在 1973 年根據實驗及觀測結果指出，自然冰核凝華成冰晶的速率主要受過飽和度控制，他並以下述經驗式表之

$$N = CS^\alpha \quad (2.4)$$

其中 N 為自然冰核核化後所得之冰晶數量， C 、 α 為常數隨地域而變， S 為冰面過飽和比。Huffman 的經驗式顯示為冰晶數量濃度是過飽和度的函數，其關係較溫度顯著，也較符合古典理論。Fletcher 的經驗式表示過冷溫度愈低可產生的冰晶數量濃度愈多，但若沒有足夠水氣是無法進行凝華核化。故 Fletcher 的經驗式容易高估高對流層的冰晶數量。為探討冰核(IN)數量濃度對降水變化所產生的影響，故在模式中使用 Huffman 的經驗式來計算冰晶數量濃度較為合宜，但由於 MM5 中所使用的 Huffman 的經驗式固定了冰核的數量濃度，因此本研究需要做若干修改以供模擬使用。

由於 Huffman 經驗式裡的總冰晶數量濃度是由冰核核化而來，其中的係數 C 與冰核總數量有關，但又包含個別冰核特性的參數，所以可將原式改為

$$N = CS^\alpha = X \cdot B \cdot S^\alpha \quad (2.5)$$

其中 X 表所有冰核的數量濃度，而單一冰核的核化能力就可以常數 B 來代表。接下來就是決定 X 與 B 的值。

Georgii 和 Kleinjung (1967)推估半徑大於 1 μm 的不可溶性氣膠粒子 (large aerosol particles; LAP)裡可能有 IN 存在。一般經驗中，在 -20°C 而維持相對於水 100%飽和度（相對於冰之過飽和度為 0.215）的情形下，大氣裡 IN 可被核化成冰晶的數量為每公升 1 個(1/L)。代入 Huffman 的經驗式並取 Huffman 所提供的 $\alpha = 4.5$ ，可求得到常數 $C = 1009$ 。若假設在 -40°C 下所有的冰核都會核化成冰晶，此時若雲內維持對水 100%飽和度，則對冰飽和度 S 為 0.474，可得每公升 35 個冰晶數量濃度。如此可得 B 值約為 28.77，而冰核的核化公式可以修改為

$$N = X \cdot 28.77 \cdot S^\alpha \quad (2.6)$$

本研究將以(2.6)式做為冰核的核化速率公式，並容許 X 值變動，以了解冰核數量濃度對降雨的影響。

三、實驗設計

本章節主要將介紹進行不同 CCN 與 IN 數量濃度的模擬測試時的模式設定、模擬個案的氣象背景以及實驗設計。

3.1 模式設定

研究所採用的 MM5 版本為 3.4 版，以下將簡介個案模擬時所使用的各項設定。地圖投影法係採用藍伯特保角投影法(Lambert Projection)，4 層多重巢狀網格(圖 3.1)，網格間距分別為 81 km、27 km、9 km、3 km，網格數則分別為 51*51、52*52、61*40、133*70，第 4 巢涵蓋範圍包含全台灣(120.01E ~ 121.995E，21.86N ~ 25.316N)，垂直層數為 24 層。模式的初始資料來自於美國國家環境預報中心以 EMC 模式模擬之全球分析場資料 NCEP/FNL，其空間解析為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，時間解析度為每六小時輸出一筆資料。

積雲參數化選擇 Grell et al(1994)所提出有利單胞對流系統發展的參數化法，但為瞭解氣膠對雲內動力的影響，故第4巢不考慮積雲參數化法。邊界層參數法採用 MRF PBL，輻射參數法選用 Cloud-Radiation scheme，而地表收支參數法則使用 Five-Layer Soil model。

3.2 模擬個案介紹

鋒面降雨為台灣地區主要的天氣特徵之一，在此選定模擬的個案分別為 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC、2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，為二種不同類型的鋒面個案，以下將加以描述個案的天氣背景。

3.2.1 2000 年 2 月 20 日氣象場分析

由 2000 年 2 月 20 日 00UTC 的綜觀地面天氣圖(圖 3.2a)上可看到日本東方海面有一中心氣壓為 994hPa 的低壓，冷鋒面自低壓中心向西南延伸至台灣東部海面，並通過台灣中部。12 小時後(圖 3.2b)，日本低壓持續加深，原本通過台灣中部的鋒面，受大陸高壓影響而往南移動並在台灣南部形滯留鋒面，21 日 00UTC 的天氣圖(圖 3.2c)顯示，日本低壓持續加深而大陸高壓持續增強，迫使鋒面更加南移，此時原本滯留在台灣南部的滯留鋒面已離開台灣來到海上，21 日 12UTC 至 22 日 00UTC(圖 3.2d)(圖 3.2e)，原本的大陸高逐漸減弱，日本低壓更加深，使原本已離開台灣的鋒面再度北上而滯留在靠近台灣南部的海上。

此個案主要為冷鋒過境，由中央氣象局的紅外線色調強化圖(圖 3.3)及色調強化圖說明(圖 3.10)，可知此個案的雲頂溫度最低溫大約在 -30°C 附近，雲頂高度發展有限。圖 3.4 為根據中央氣象局測站資料所繪之地面累積雨量圖，以 21 日的累積降雨量較高，降雨幾乎遍布全台。將第四巢模擬區域所有自動雨量站(共 363 個)平均，得到的 48 小時(20 日 00UTC 到 22 日 00UTC)累積降雨圖如圖 3.5 所示。此個案的對流雖不旺盛，但是由於屬於大片層狀降水，從累積降雨圖可看出降水時間較持久，所以累積的降雨量高達 80 mm。

3.2.2 2003 年 5 月 16 日氣象場分析

由 2003 年 5 月 16 日 00UTC 的綜觀地面天氣圖(圖 3.6a)上可看到日本東方海面有一中心氣壓為 994hPa 的低壓，大陸渤海一帶有二個中心氣壓為 1014hPa 的高壓，鋒面自低壓中心向西南延伸到台灣東部海面並通過台灣南部，台灣剛好位於冷鋒和滯留鋒面交界處。12 小時後(圖 3.6b)日本低壓稍有減弱並且往東北移動，此時高壓出現在日本西側海域，使通過台灣

的滯留鋒面向北移動。17日 00UTC 至 12UTC 的地面天氣圖(圖 3.6c)(圖 3.6d)顯示，低壓持續往東北方移動，滯留鋒面仍通過台灣，台灣東北方海面上有一低壓生成。18日 00UTC 地面天氣圖(圖 3.6e)顯示原台灣東北方低壓持續向東北移動，受大陸渤海上方的高壓影響，滯留鋒仍停留在台灣。

由中央氣象局紅外線色調強化圖(圖 3.7)可知，此個案具有較強的深對流胞，因此雲頂溫度較低，顯示雲頂可發展至較高處。圖 3.8 為中央氣象局地面累積雨量圖，受滯留鋒面影響，16 日的累積雨量圖顯示降雨集中在台灣西北部，而 17 日的降雨則集中在中部地區。將第四巢模擬區域所有自動雨量站(共 369 個)平均，得到的 48 小時(16 日 00UTC 到 18 日 00UTC)累積降雨圖如圖 3.9 所示。雖然此個案具有強對流，但由累積降雨圖可以看出降雨過程並非持續進行，因此雖然有強對流，但是累積的降雨量不如 2000 年 2 月 20 日的個案。



3.3 實驗設計

實驗設計簡圖如圖 3.11，測試不同數量濃度的 CCN 和 IN 值將放入模式中測試其對降水過程中的影響。

實驗控制組(Control Run; CR)的 CCN 數量濃度以及粒徑分布係根據 Whitby (1978)之分析結果，以三個對數常態分布來表示氣膠粒子粒徑分布的核模(nuclei mode)、累積模(accumulation mode)、粗模(coarse mode)等三個分類。在此實驗控制組採用平均背景型的氣膠粒徑分布(表 3.1)，以更改核模、累積模的數量級當作 CCN 數量濃度變化的模擬測試。由於粗模粒子大多為特定的自然源，且有較特殊的成分和特性，而本研究主要想看人為氣膠的作用，需要再另外考慮氣膠的成分和特性，故在此不對粗模做任何變動。

Chen (1994)根據 Fletcher、Georgii 及 Kleinjung 提出的關係式和數據，推估出大氣中 IN 的數量為 400L^{-1} ，即每公升有 400 個 IN，這和 Young(1974b)得到的數據 230/L，兩者數量級一樣，故在此設定實驗控制組的 IN 數量濃度為 400L^{-1} 。

實驗一

以 2000 年 2 月 20 日的個案為例，每個實驗組的 IN 值固定同實驗控制組的值，僅更改 CCN 數量濃度的數量級進行模擬，其它設定同實驗控制組，除了”warm”組為純暖雲過程，無冰相過程。各組設定如表 3.2 所示。

實驗二

以 2000 年 2 月 20 日的個案為例，同質核化實驗組設定其 IN 值為零，冰晶生成主要來源為同質凍結，CCN 值則和實驗控制組相同;其它實驗組設定同實驗控制組，僅更改 IN 數量濃度的數量級進行模擬。實驗設計如表 3.3 所示。

實驗三

與實驗一相同，但以 2003 年 5 月 16 日的個案為例。各組設定如表 3.2 所示。

實驗四

與實驗二相同，但以 2003 年 5 月 16 日的個案為例。實驗設計如表 3.3 所示。

四、模擬結果

本章將分別就各組實驗之模擬結果，包括降水量、雲水混合比、雨水混合比、雲冰混合比、雪混合比、雹混合比、雲滴和雨滴的數量濃度及大小、生長率以及垂直風速等變數進行分析。

4.1 CCN 影響 2000/02/20 個案

實驗一為 2000/02/20 個案為主，在 IN 數量濃度固定為 400/L 的狀態下，模擬不同數量級的 CCN 數量濃度對個案降水的影響。由 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC 模擬 48 小時累積降雨量圖(圖 4.1)中可看出，無冰相過程的暖雲降水所得到的累積降水量最少，其它各組的累積降雨量則隨 CCN 數量濃度的增加而減少，以 CCN*0.01 所得之累積降雨量最高，而 CCN*100 所得到的累積降雨量為最低。模擬 48 小時的累積降雨量圖和觀測資料所得之累積降雨量(圖 3.5)的曲線分布相似，但是觀測資料得到的累積降雨量為接近 80mm，模擬結果卻只有 25mm 而已，這有可能是因為個案模擬時間為 48hr，而 MM5 模式隨著時間增長，會使預報能力逐漸降低；另一個原因可能是因為模式使用的雲微物理參數在處理降水強度的部分較弱導致低估降水，再經過區域平均後的降水模擬結果會更容易產生較大的偏差。圖 4.2 為 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC 平均溫度模擬結果，由圖中可得知 0°C 介於 σ (Sigma 座標)= 0.5 和 $\sigma = 0.6$ 高度之間。

由實驗一的雲水混合比(圖 4.3)、雲滴數量濃度(圖 4.4)和雲滴粒徑大小(圖 4.5)之模擬結果，可看出 CCN 的數量級愈高其雲水混合比愈高，整層雲水厚度(圖 4.3f)以 CCN*100 最大，且可產生數量較多但粒徑小的雲滴數量濃度，這結果和 Twomey 所提出之氣膠間接效應理論相同，當 CCN 數

量濃度愈高可產生數量較多但粒徑較小的小雲滴，由於小雲滴碰撞成為雨滴或被雨滴收集的效率低，致使降水減少而留在空中的液態水變多。

由圖 4.6 和圖 4.7 可看出雨水混合比和雨滴的數量濃度為隨著 CCN 數量濃度愈高而愈低，圖 4.6 中可看到在 $\sigma = 0.6$ 高度以下有許多柱狀降水集中時區，整層雨水厚度(圖 4.6f)以 $CCN * 0.01$ 較高。圖 4.8 為雨滴的粒徑大小分布，可看出有許多小雨滴累積在 $\sigma = 0.5$ 高度之上， $\sigma = 0.5$ 以下則有許多大雨滴出現，根據平均溫度模擬結果顯示(圖 4.2)， $0^{\circ}C$ 介於 $\sigma = 0.5$ 和 $\sigma = 0.6$ 之間，所以這些低空的雨滴可能主要是來自於雪或雹的融化。

各組的雲冰混合比(圖 4.9)和冰晶數量濃度(圖 4.10)隨 CCN 數量濃度大小呈單調變化，以 $CCN * 100$ 雲冰混合比較高，圖 4.11 為雲冰的生長率，亦可看出以 $CCN * 100$ 的雲冰生長率較高。在 $\sigma = 0.1$ 的上空有大量的冰數量濃度累積在此，在第三章曾介紹過 2000/02/20 個案的雲頂溫度大約在 $-30^{\circ}C$ 附近，對流發展並不旺盛，雲頂高度發展有限，故這些高空的雲冰可能是來自於近對流層頂的高空層狀卷雲，並非此對流雲的一部份。

圖 4.12、4.13 分別為雪和雹的混合比，雪的混合比隨 CCN 數量濃度增加而增加，但雹混合比則不是呈線性變化。由雪和雹的生長率垂直分佈可看出雪的雲冰自動轉換(圖 4.14a)、凝華成長等生長機制(圖 4.14c)，隨 CCN 濃度增加而呈單調性增強，但淞化成長(riming; 圖 4.14e)則相反，因為碰撞效率隨雲滴變小而降低;軟雹的情況也類似。但雪的增長過程以凝華成長為主，因此當 CCN 較多時，產生較多的小雲滴蒸發率較高，在次飽和的狀態下有利於白吉龍-芬代生過程。軟雹的增長過程以淞化成長為主，在軟雹與雲滴粒徑愈大時淞化成長愈快速，而 CCN 愈多讓雲滴愈小則使此機制減弱，造成在中間值的 CCN 濃度下有較多的軟雹(圖 4.14f)。

將雪和雹融化而成的雨稱為冷雨，由圖 4.15 和圖 4.16 可知冷雨來源主要來自於雪的融化，雹的降雨貢獻較小。雖然 $CCN * 100$ 的雪直接融化率高於其它各組，但是在被暖雨收集而融化的效率低於其它組，所以反而

是產生降水最少的一組，而以 $CCN*0.01$ 這一組的降水最高。

有研究認為人為汙染產生的氣膠會影響對流雲發展和地形雨的降水過程(Rosenfeld et al., 2000b, 2006)，即氣膠增加造成更多雲水進入高空因而增加潛熱釋放，會對雲內動力造成影響，為瞭解氣膠的數量濃度是否對雲內的上升運動造成影響，因此統計個案模擬的 48 小時內(圖 4.16)，在 $-3 \text{ m/s} \sim 6 \text{ m/s}$ 之間以每 0.5 m/s 為一個區間，計算所有區間內風速出現的次數。各組的風速分布大致相近，出現最多風速次數主要在 $-1 \text{ m/s} \sim 1 \text{ m/s}$ 之間。若以圖 4.18 的距平圖來看，可發現介於 $-2 \text{ m/s} \sim 2 \text{ m/s}$ 之間的風速出現的次數會隨 CCN 濃度增加而增加，可能是因為 CCN 較多可產生的雲滴數量濃度較高，被帶到高空時透過雲滴凍結，而有潛熱釋放加強上升運動；但最強的上升氣流頻率卻降低。可能發生的情況是，雲滴轉換為冰晶(透過凍結或 Bergeron-Findeisen 過程)非立即發生在強對流區，而是在層狀降水區，因此所增強的是弱上升氣流，而較強對流區反而受到 loading 等因素的抑制。

4.2 IN 影響 2000/02/20 個案

實驗二為 2000/02/20 個案，在 CCN 數量濃度固定下，模擬不同 IN 數量濃度的數量級對個案降水的影響，由 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC 模擬 48 小時累積降雨量圖(圖 4.19)中，降雨量大致隨 IN 增加而稍有增加，但並不是線性的表現，各組的累積降雨量非常接近，以 $IN*10$ 的累積降雨量最高。而其中比較特別的是若只考慮同質核化(即 $IN=0$)時，其累積降雨量也和 $IN*10$ 這一組非常接近。

從雲水混合比(圖 4.21)、雲滴的數量濃度(圖 4.22)、雲滴粒徑大小(圖 4.23)分布圖以及整層雲水厚度(圖 4.20a)，可得知 6 組的分布相近，增加 IN 的數量濃度有使雲滴數量濃度略為增加一些。圖 4.24 和圖 4.20b 為整層雨

水混合比及雨水整層厚度，6組的分布非常接近，圖中可看到在 $\sigma=0.6$ 高度以下有許多柱狀降水集中時區。由圖 4.25 可看到當 IN 為 0 時所產生的雨滴數量濃度最少，隨 IN 數量濃度增加， $\sigma=0.5$ 高度以上的雨滴的數量有減少的傾向；而在 $\sigma=0.6$ 高度以下，IN*0.01 和 IN*0.1 隨 IN 增加而雨滴數量濃度增加，但是 IN*10 和 IN*100 這 2 組的卻是出現相反的結果，反而是隨 IN 增加而減少雨滴數量濃度。雨滴的粒徑大小分圖(圖 4.26)則顯示 IN*100 的雨滴粒徑大小較 IN*10 的小。有許多小雨滴集中在 $\sigma=0.5$ 高度以上，以在 IN = 0、 $\sigma=0.5$ 高度以上則擁有最多小雨滴，IN*100 的小雨滴數量最少。這一方面可能表示有小雨滴被較多的冰晶收集，另外也可能在 IN 較多的情況下，雪、雹都比較小，因此沈降到低處融化成冷雨的量也較少。

圖 4.27 和圖 4.28 分別為雲冰混合比圖、冰晶數量濃度圖，當 IN 數量濃度增加時，雲冰混合比、冰晶數量濃度也隨之提高，雲冰的生長率垂直分布圖(圖 4.29)也顯示 IN 的數量級愈高產生的雲冰愈多。但是雪的混合比(圖 4.30)卻是呈現非線性的結果，雹的混合比(圖 4.31)則隨 IN 數量濃度增加而有減少的趨向，由圖 4.32 的雪和雹的生長率來看，IN 增加有較多雲冰轉換成雪，可是在凝華成長的部份卻是以 CCN*10 的較高；雹則不一定。雪融化率(圖 4.33)顯示 IN*100 有較多的雪融化成雨滴，但是雹的融化率(圖 4.34)則顯示在 IN=10 有較多的雹融化為雨水，IN*100 反而融化的雹最少，因此累積的地面降水量反而以 IN*10 較其它組稍微高一些，這有可能是因為 IN 太多，彼此的競爭使個別軟雹的成長變緩，因而滯留在高空而無法落下，由結果顯示雪和雹受 IN 數量濃度影響，因個種環境的限制而呈非線性關係。

圖 4.35 為統計所模擬的 48 小時內，在-3 m/s ~ 6 m/s 之間以每 0.5m/s 為一個區間，計算所有區間內風速出現的次數。各組的風速分布大致相近，出現最多風速次數主要在-1 m/s~1 m/s 之間，若以圖 4.36 的距平圖來

看，可發現不管增加 IN 或是減少 IN 數量濃度，皆是使最大上升風速和最大下降風速出現的次數減少，這有可能是因為 IN 較多產生較多的冰晶，形成過多的小冰晶反而會互搶水氣，造成冰晶滯留在空中的時間拉長；較少的 IN 則不利冰相粒子的成長，減少冰相粒子的降雨過程，因而使較強對流區反而減弱。

實驗二結果顯示在此個案內加入不同的 IN 數量濃度對降水的影響有限，雖然增加 IN*10 的數量濃度降水雖然高於其它組，但是差異不大，而且考慮 IN 為零的情形下，其降雨量和 IN*10 幾乎相同，可能是由於此個案以暖雲降水過程佔主導優勢，才會導致在此個案裡增加 IN 的數量濃度不一定能有效率的增加地面降水量。另外侵入核化也可能扮演重要的角色，由於侵入核化也能提供顯著的冰晶，有可能使考慮的凝華(包括凝結、凍結)核化的角色減弱。

4.3 CCN 影響 2003/05/16 個案

實驗三為 2003/05/16 的個案，在 IN 數量濃度固定為 400/L 的狀態下，模擬不同數量級的 CCN 數量濃度對個案降水的影響，由 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC 模擬 48 小時累積降雨量圖(圖 4.37)中可看出，以 CCN*100 所得到的累積降雨量為最高，而以 CCN*0.01 所得之累積降雨量則為最低，此情形和實驗一結果相左。圖 4.38 為 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC 平均溫度模擬結果，其 0°C 線在 $\sigma = 0.5$ 高度以上，比 2000/02/20 個案的高度稍微高一些。

由雲水混合比圖(圖 4.39)、雲滴數量濃度圖(圖 4.40)可得知當 CCN 數量濃度愈高雲滴愈多，雲內過和飽度則愈低，雲水混合比自然就比較高，由整層雲水厚度(圖 4.39f)亦可看出 CCN*100 的整層雲水厚度最

大;CCN*0.01 的整層雲水厚度最小。同時，在暖雲區內雲滴數量濃度高時雲滴變小(圖 4.41)，會抑制雨滴碰撞成長，也會使雲水變多。圖 4.42 為雨水混合比圖，雨水混合比並非隨 CCN 數量濃度呈線性變化，由整層雨水厚度(圖 4.42f)可知實驗控制組的整層雨水厚度最小;CCN*100 的整層雨水厚度最大。CCN*10 和 CCN*100 這兩組不僅雲滴數量高，雨滴混合比和雨滴數量濃度(圖 4.43)也都較實驗控制組高，推測可能是因為此個案本身的鋒面系統具有劇烈深對流，可把較多的雲滴帶往高空，而被帶到高空較多的雲滴有利於白吉龍-芬代生過程，加速冰晶成長，加強冷雨過程，所以雨滴粒徑大小(圖 4.44)也隨著 CCN 增加而變大。雲冰混合比(圖 4.45)、冰晶數量濃度(圖 4.46)和雲冰生長率的垂直分布圖(圖 4.47)也顯示 CCN 多時有較多的冰晶形成，也有較多的雲冰轉為雪與電收集。

雪混合比(圖 4.48)隨 CCN 增加而增加，電混合比(圖 4.49)也是隨 CCN 增加而增加，但是在 CCN*100 的電混合比反而小於 CCN*10，這可能是因為 CCN*100 產生的小雲滴太多反而不利電的淞化成長，是故其電混合比小於 CCN*10。

由圖 4.50 的雪和電生長率圖可看出，CCN*100 有較多的雲冰轉換成雪和電，凝結生長率也是以 CCN*100 的最高，這表示在此個案增加 CCN 數量濃度不僅加強了雲冰轉換率，也加強白吉龍效應，使冰晶可以更加成長。從雪融化率來看(圖 4.51)，CCN*100 對降水的貢獻明顯高出其它組許多，因此有較多的冰相降水生成，所以 CCN*100 這一組的累積降雨量最高。

電的融化率(圖 4.52)則以 CCN*10 的融化率最高，這有可能是因為 CCN*100 的所形成的小雲滴抑制了軟電的淞化成長，所以 CCN*100 的電融化率反而比 CCN*10 的小，也因此 CCN*100 的電提供的冰相降水小於 CCN*10，但是由於降水貢獻以雪融化率為主，是故累積的地面降水量以 CCN*100 最高，而 CCN*0.01 的最低。

圖 4.53 為統計此個案所模擬的 48 小時內，在 $-3 \text{ m/s} \sim 8 \text{ m/s}$ 之間以每 0.5 m/s 為一個區間，計算所有區間內風速出現的次數。各組的風速分布大致相近，但若以圖 4.54 的距平圖來看，增加 CCN 的數量濃度會使 $1 \text{ m/s} \sim 6 \text{ m/s}$ 之間的上升風速出現次數增加，由此可知 CCN 的數量濃度的增加，會影響到深對流雲的動力過程。

4.4 IN 影響 2003/05/16 個案

實驗四為 2003/05/16 個案，在 CCN 數量濃度固定下，模擬不同 IN 數量濃度的數量級對個案降水的影響，由 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC 模擬 48 小時累積降雨量圖(圖 4.55)中可看出，各組的累積降雨量非常接近，以 $IN*100$ 的累積降雨量最高; $IN = 0$ 時的累積降雨量最低。其中較特別的是 $IN*0.1$ 和 $IN*0.01$ 的降雨量均高於 CR，可知累積降雨量並非呈線性變化。

雲水混合比(圖 4.57)、整層雲水厚度(圖 4.56a)、雲滴數量濃度(圖 4.58)和雲滴粒徑大小(圖 4.59)，顯示各組分布大致相似，但也和總降水一樣隨 IN 數量濃度增加呈非線性變化，這與後續討論的眾夕相互消長的複雜機制有關。由雨水混合比(圖 4.60)、整層雲水厚度(圖 4.56b)可看出以 $IN*100$ 的較高一些，雨滴數量濃度(圖 4.61)和雨滴粒徑大小(圖 4.62)分布則呈非線性的變化，各組在主要的對流降雨時間內雨滴粒徑大小都比較大，表示有較多的冰相粒子融化成雨滴。雲冰混合比(圖 4.63)和冰晶的數量濃度(圖 4.64)隨 IN 增加而增加，比較特別的是 $IN*0.01$ 在 2003/05/16 12UTC 至 2003/05/17 00UTC 之間高空的雲冰混合比較 $IN*0.1$ 的為高，其原因可能是由於對流較強使雲發展較高而同質凍結也較強的關係。而冰晶的數量濃度(圖 4.64)和雲冰生長率垂直分布(圖 4.65)雖是隨 IN 數量濃度增加而增加，

但 $IN*0.01$ 的雲冰生長率和冰晶數量濃度均大於 $IN*0.1$ 。

雪的混合比(圖 4.66)大致則隨 IN 增加而增加，以 $IN*100$ 的雪混合比最高，由於 $IN*100$ 有較高的雲滴混合比，因此雲滴數量濃度較高，若是處於次飽和狀態下的其蒸發率較高，這樣有利於白吉龍-芬代生過程(Bergeron-Findeisen process)，這會增加雪的混合比，而低層雨滴混合比則會增加，可使降雨量增加。但雹的混合比(圖 4.67)則是隨 IN 增加而減少，可能是因為 IN 太多反而抑制雹的成長。

由雪和雹的生長率來做分析(圖 4.68)，亦可得知雪的增長以雲冰轉換為雪的自動轉換機制和撞併過程為主，隨 IN 增加而增加;雹的生長率則是以撞併過程為主。雪和雹的凝結成長部份皆是隨 IN 增加而減少，以同質凍結最高，這有可能是高空是處在極低溫的情形下，水氣可直接同質凍結， IN 的增加則有利於撞併過程。

雪的融化(圖 4.69)為此個案的主要降水貢獻，但各組的融化率相近，以 $IN*100$ 稍微高一些。雹的融化(圖 4.70)對此個案的降水貢獻較雪小，以 $IN*100$ 的雹的融化較低一些，但是由於雪的融化率較雹的融化率高，故以 $IN*100$ 這一組的地面累積降水量最高。

圖 4.71 為統計此個案所模擬的 48 小時內，在 $-3 \text{ m/s} \sim 8 \text{ m/s}$ 之間以每 0.5 m/s 為一個區間，計算所有區間內風速出現的次數。各組的風速分布大致相近，以圖 4.72 的距平圖來看，則顯示不管是增加或減少 IN 的數量濃度均會使較大上升風速出現次數減少，由此可知在此個案裡 IN 的作用似乎是會抑制對流的發展。通常在個別雲中， IN 增加應會增強潛熱釋放，但潛熱釋放時機(包括時間與空間配置)則不一定與對流的發展配合，而補償性沈降或降水造成的下衝流等動力機制所造成的雲和雲之間的交互作用則可能也很複雜，不一定導致有利降水的結果。

五、結論

綜合以上四個實驗結果可知氣膠對不同天氣系統的降水型式會有不同的影響。各實驗的結果大致歸納如下:

- (1) CCN 數量變化：實驗一的個案為對流發展較弱的鋒面降雨系統，在固定 IN 數量濃度的狀態下，更改 CCN 的數量濃度的數量級以探討 CCN 數量濃度對降水的影響。研究結果指出在此個案裡增加 CCN 會增加雲滴的數量濃度，降低水氣飽和比並且抑制雨滴的生成，因此會使降水減少。實驗三的個案為對流發展較強的深對流系統，模擬結果顯示在深對流系統內增加 CCN 數量濃度會增加雲滴的數量濃度，並且會抑制暖雨過程，而雲滴數量濃度的增加會讓雲滴粒徑變小，進而抑制雨滴的碰撞成長，因此會使雲水增多，使更多的雲水被深對流系統帶往高空，增加雲滴凍結的機會，有利於白吉龍-芬代生過程加強冰晶成長；但雲滴變小則不利於淞化成長過程，這對軟雹的成長尤其不利。此個案冷雨的形成以雪為主，因此綜合的結果是使地面降水增加。
- (2) IN 數量變化：實驗二及實驗四則是 CCN 數量濃度固定的狀態下，更改 IN 的數量濃度的數量級以探討 IN 數量濃度對降水的影響。研究結果顯示在此兩個案增加 IN 雖然可以增加降水，但是並未有顯著的變化影響，IN 的存在有利於冰相粒子的生成，可提高雪、雹的增長，但是在凝華成長的部份，卻是呈非線性的變化，這有可能是因為浸入核化機制也可提供顯著的冰晶，所以反而使凝華核化的角色減弱。
- (3) 潛熱釋放與垂直運動：理論上，高 CCN 狀態下會有較多雲水被帶到高空轉換成冰，所增加的潛熱釋放理再加強對流的強度。由個案的垂直速度頻譜分析來看，只有個案二大致顯示出此效果，個案一則否。但是不管增加減少 IN 數量濃度，顯示的結果大多是使較大風速出現的頻

率減少，而且以在深對流系統最為明顯，顯示 IN 的增加有可能會降低較大的垂直風速出現的次數。

本研究針對氣膠對降水的影響的部份，僅挑選兩個鋒面個案來進行模擬而已，所得結果無法以一概之推演到所有的降水系統。且此次的研究結果在 IN 的部份並未有顯著的變化，顯示模式所使用的 CLR 參數法在處理冰晶的異質核化途徑的模擬過程需要進行若干修正。CLR 參數法在處理冰晶的異質核化途徑包含有異質凝華核化(heterogeneous deposition)、異質凝結凍結核化(condensation followed by freezing)、接觸核化(contact)、浸入核化(immersion)等，但是此研究對浸入核化的部份著墨不多，而浸入核化可能為 IN 影響降水的關鍵之一。未來除了改進模式微物理機制的缺失以外，仍需進一步深入研究其它不同天氣系統的降水過程做更深入的研究，才能更加瞭解氣膠對降水的影響。



參考文獻:

王寶貫，1997：雲物理學，國立編譯館主編，渤海堂文化事業有限公司。

332 pp.

Ackerman, A. S., O. B. Toon, J. P. Taylor, D. Johnson, P. V. Hobbs, and R. J. Ferek, 2000: Effects of Aerosols on cloud Albedo: Evaluation of Twomey's Parameterization of cloud Susceptibility Using Measurements of Ship Tracks.

J. Atmos. Sci., **57**, 2684-2695.

Albrecht BA. 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness.

Science **245**: 1227-1230.

Cooper, W. A., and R. T. Bruintjes, and G. K. Mather, 1997: Some calculations pertaining to hygroscopic seeding with flares. *J Appl. Meteor.*, **36**, 1449-1469.

Cotton, W. R., 1986: Testing, implementation, and evolution of seeding concepts—A review. *Rainfall enhancement—A Scientific challenge, Meteor. Monogr.*, **43**, *Amer. Meteor. Soc.*, 139-149.

Chen, J.-P., and Dennis Lamb, 1994: Simulation of cloud microphysical and chemical process using a multicomponent framework. Part I: Description of the microphysical model. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2613-2630.

Chen, J.-P., and Liu, S.-T., 2004: Physically based two-moment bulkwater parameterization for warm-cloud microphysics. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 57-78.

Cheng, C.-T., Wei-chyung Wang and Jen-Ping Chen, 2007a: A modelling study of aerosol impacts on cloud microphysics and radiative properties. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **133**, 283-297.

Cheng, C.-T., Wang, w.-C., and Chen, J.-P., 2007b: A modelling study of CCN number on cloud microphysics in a deep convection system. *9th WMO*

Scientific Conference on Weather Modification.

- DeMott, P. J., and D. C. Roger, 1990: Freezing nucleation rates of dilute solution droplets measured between -30°C and -40°C in laboratory simulations of natural clouds. *J Atmos. Sci.*, **47**, 1056-1064.
- Feingold, G., Cotton, W. R., Kreidenweis, S. M., & Davis, J. T. 1999: The impact of giant cloud condensation nuclei on drizzle formation in stratocumulus: Implications for cloud radiative properties. *Journal of Geophysical Research*, **56**, 4100-4177.
- Fletcher, N. H., 1962: The physics of rainclouds. Cambridge University Press, 390 pp.
- Flossmann, A. I., 1998: Interaction of aerosol particles and clouds. *J Atmos. Sci.*, **55**, 879-887.
- Georgii, H. W., and e. Kleinjung, 1967: Relations between the chemical composition of atmospherical aerosol particles and the concentration of natural ice nuclei. *J. Rech. Atmos.*, **3**, 145-156.
- Grell, G. A., J. dudhia, and d. R., Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn Stat/NCAR mesoscal model (MM5), *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-398+STR, pp.121
- Huffman, P. J., 1973: supersaturation spectra of AGI and natural ice nuclei. *J. Appl. Meteor.*, **12**, 1080-1081.
- Kogan, Y. L., 1991: The simulation of a convective cloud in a 3-D model with explicit microphysics. Part I: Model description and sensitivity experiments, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1160-1189.
- Khain, a., d. Rosenfeld, and a. Pokrovsky, 2005: aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2639-2663.

- Lau, M. K., and Wu, H.T., 2003: Warm rain processes over tropical oceans and climate implications. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2290.
- Liou, K.-N., and S.-C. Ou, 1989: The Role of Cloud Microphysical Processes in Climate: An Assessment From a One-Dimensional Perspective. *J. Geophys. Res.*, **94**(D6), 8599-8607.
- Mather, G. K., d. E. Terblanche, F. E. Steffens, and L. Fletcher, 1997: Results of the south African cloud seeding experiments using hygroscopic flares. *J. appl. Meteor.*, **36**, 1433-1447.
- Orville, R.E., R. Zhang, J. N. Gammon, d. Collins, B. Ely and s. Steiger, 2001: enhancement of cloud-to-ground lightening over Houston, Texas, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2597-2600.
- Reisner, R. M., and Brientjes, R. T., 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storm using the MM5 mesocale model. *Q. J. Meteorol. Soc.*, **124**, 1071-1107.
- Rosenfeld D., and W. L. Woodley, 2000a: Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37.5°C . *Nature*, **405**, 440-442.
- Rosenfeld D., 2000b: Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, **287**,1793-1796.
- Rosenfeld, D., Lahav, R., Khain, a. P., & Pinsky, M. 2002: The role of sea spray in cleansing air pollution over ocean via cloud processes. *Science*, **297**, 1668-1670.
- Rosenfeld, D., Amir Givati, 2006: Evidence of orographic precipitation suppression by air pollution-induced aerosols in the western united states. **45**, *Amer. Meteor. Soc.*, 893-911.
- Ryan, Brian, F., 2000: A bulk parameterization of the ice particle size distribution and the optical properties in ice clouds. *J. atmos. Sci.*, **57**,

1436-1451.

- Tao, W., X. Li, A. Khain, T. Matsui, S. Lang, and J. Simpson, 2007: Role of atmospheric aerosol concentration on deep convective precipitation: Cloud-resolving model simulations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S18, doi:10.1029/2007JD008728.
- Teller, A., and Z. Levin, 2006: The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds: a sensitivity study using a numerical cloud model. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 67–80.
- Twomey, S. A., 1977: The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149-1152.
- Van Den Heever, S., Gustavo G. Carrió, William R. Cotton, Paul. J DeMott, and Anthony J. Prenni, 2006: Impacts of nucleating aerosol on Florida storms. Part I: mesoscale simulation. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1752-1775.
- Van Den Heever, S. and William R. Cotton, 2007: Urban aerosol impacts on downwind convective storms. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 828–850.
- Whitby, K. T., 1978: The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmos. Environ.*, **12**, 135-159.
- Williams, E., D. Rosenfeld, N. Madden, J. Gerlach, N. Gears, L. Atkinson, N. Dunnemann, G. Frostrom, M. Antonio, B. Biazon, R. Camargo, H. Franca, A. Gomes, M. Lima, R. Machado, S. Manhaes, L. Nachtigall, H. Piva, W. Quintiliano, L. Machado, P. Artaxo, G. Roberts, N. Renno, R. Blakeslee, J. Bailey, D. Boccippio, A. Betts, D. Wolff, B. Roy, J. Halverson, T. Rickenbach, J. Fuentes, and E. Avelino, 2002: Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification. *J. Geophys. Res.*, **107**(D20), 8082.
- Young, T. R., and J. P. Boris, 1977: A numerical technique for solving stiff

ordinary differential equations associated with the chemical kinetics of reactive-flow problem. *J. Phys. Chem.*, **81** (25), 2424-2427.

Zhang, L., Michelangeli, D. V., & Taylor, P. A., 2006: Influence of aerosol concentration on precipitation formation in low-level, warm stratiform clouds. *J. Aerosol Science*, **37**, 203-217.



圖表

表 3.1: 海洋型(clean)、平均背景型(Average)和都市型(Urban)氣膠，其核模(nuclei mode; Nu)、累積模(accumulation mode; Ac)和粗模(coarse mode; Co)的數量濃度、平均粒子大小和幾何寬度。(Whitby, 1978)

Mode(factor)	Number (cm ⁻³)			Mean (μm)			Geometric width		
	Nu (×10 ³)	Ac (×10 ³)	Co	Nu (×10 ⁻³)	Ac (×10 ⁻²)	Co	Nu	Ac	Co
Clean	1.0	0.8	0.72	8.0	3.3	0.46	0.47	0.74	0.79
Average	6.4	2.3	3.20	7.5	3.8	0.51	0.53	0.69	0.77
urban	106.	32.0	5.4	7.0	2.7	0.43	0.59	0.77	0.79

表 3.2: CCN 和 IN 數量濃度設定簡表

	Warm	CR	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
CCN (Nu; Ac)	× 1	× 1	× 10	× 10 ²	× 10 ⁻¹	× 10 ⁻²
IN	0	400/L	400/L	400/L	400/L	400/L

表 3.3: CCN 和 IN 數量濃度設定簡表

	Homo	CR	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
CCN (Nu; Ac)	× 1	× 1	× 1	× 1	× 1	× 1
IN	0	400/L	4000/L	40000/L	40/L	4/L

The MM5 Modeling System Flow Chart

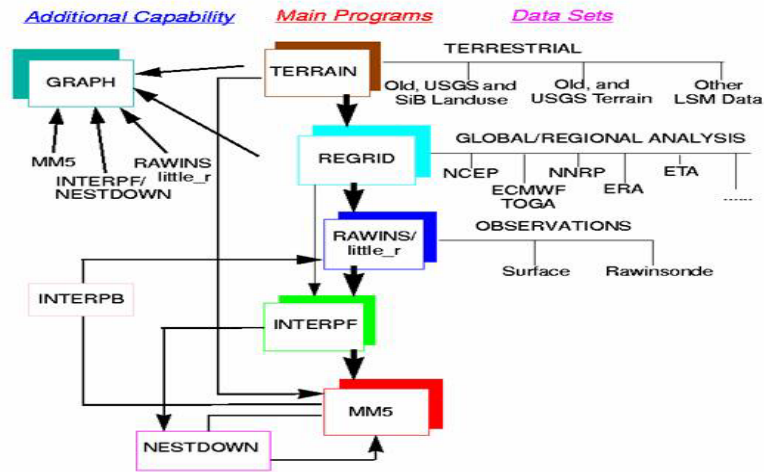


圖 2.1: MM5 模式架構圖(摘錄自 MM5 使用者手冊)

Direct Interactions of Parameterizations

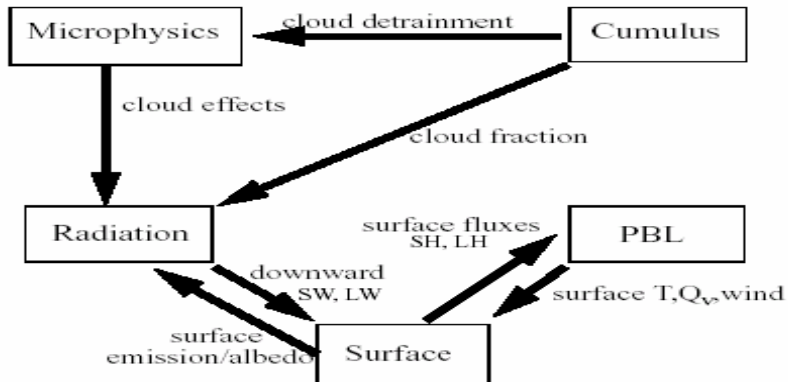


圖 2.2: MM5 各種參數法關係圖(摘錄自 MM5 使用者手冊)

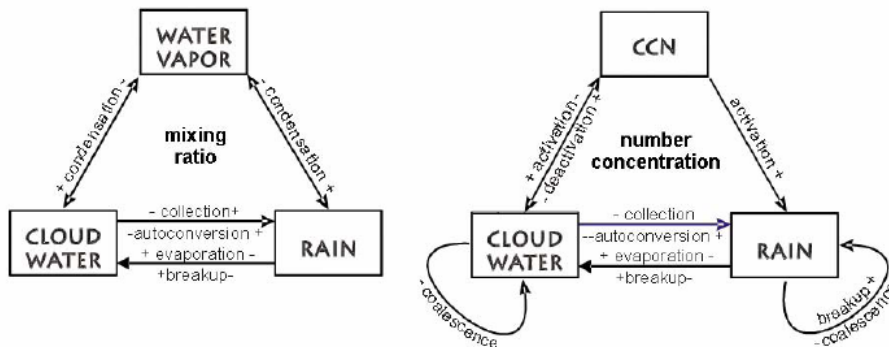


圖 2.3: 左圖和右圖分別代表 C&L Scheme 中混合比和數量濃度所交互影響之物理過程。正(負)表示對凝結過程為正(負)回饋。(摘錄自 Chen and Liu, 2004)

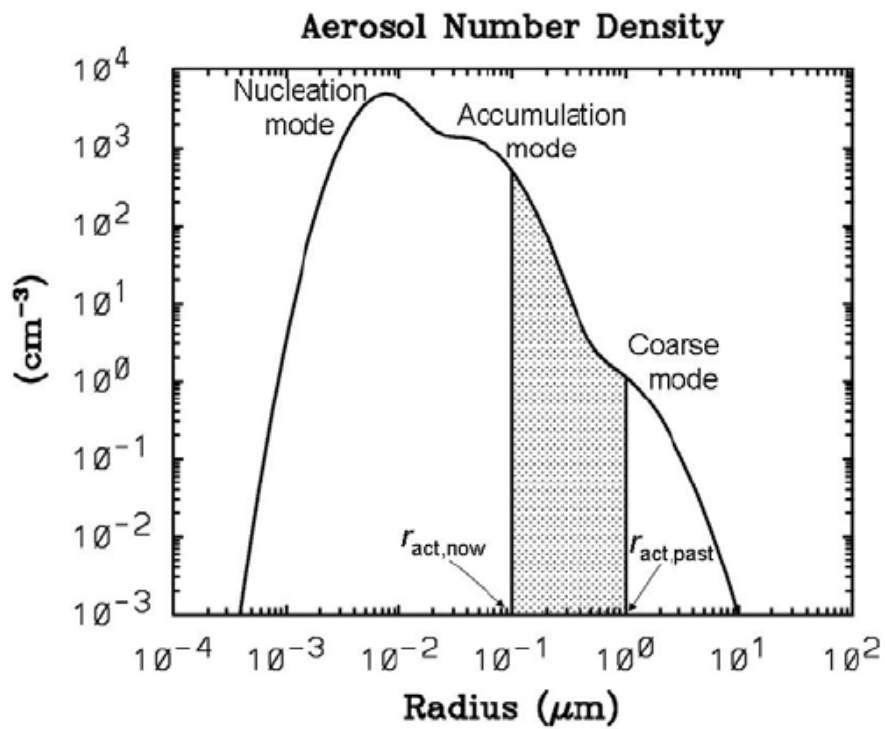


圖 2.4: 三模對數常態粒徑分布圖(摘錄自 Cheng et al. 2007a)

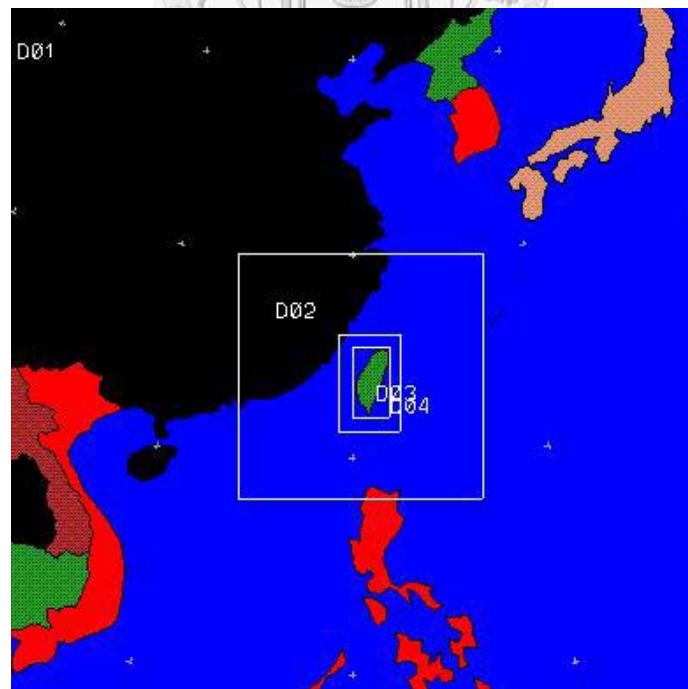
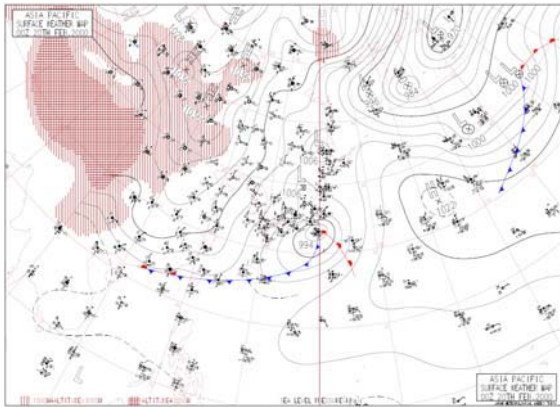
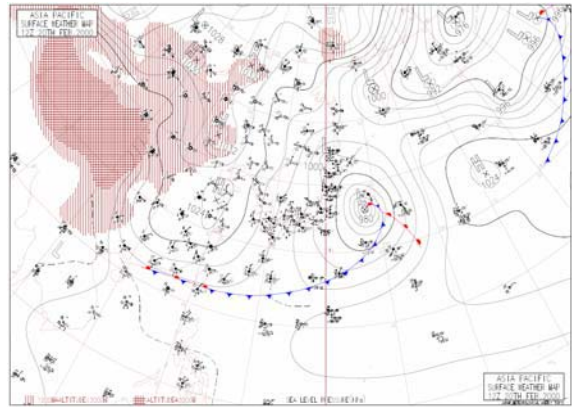


圖 3.1: 設定 MM5 模式 4 巢所涵蓋範圍, 網格數分別為 51*51、52*52、61*40、133*70。

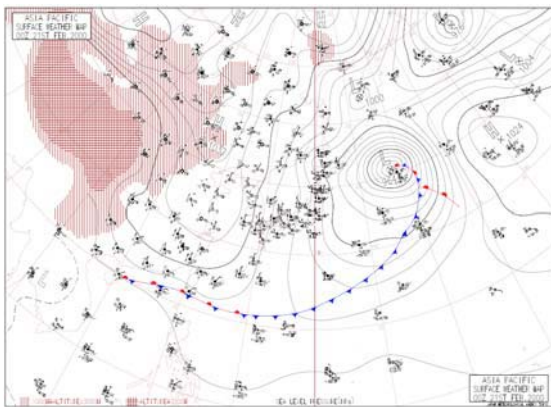
(a)



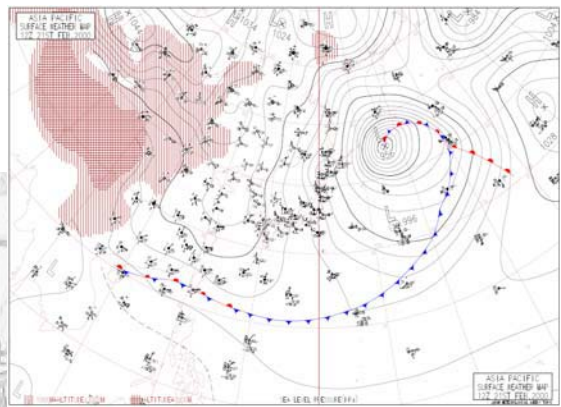
(b)



(c)



(d)



(e)

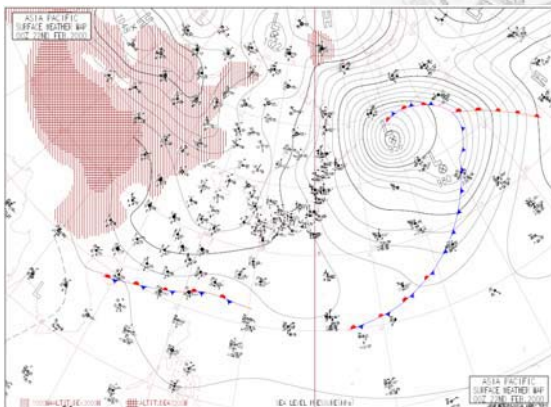
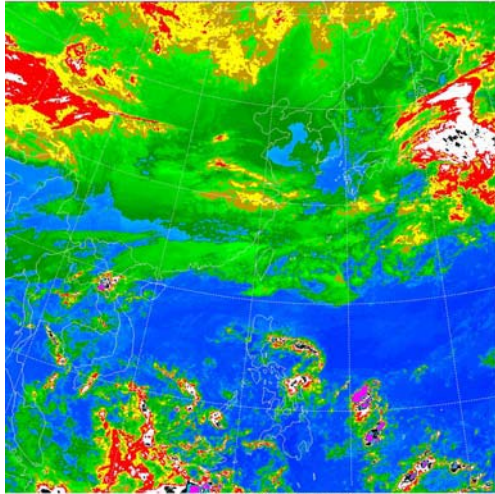


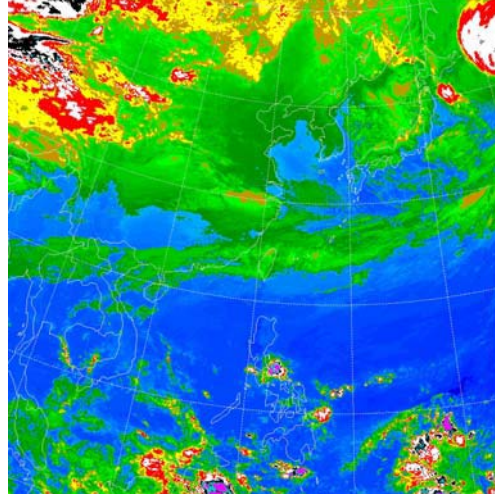
圖 3.2: 日本氣象廳綜觀地面天氣圖。(a) 2000 年 2 月 20 日 00UTC, (b) 2000 年 2 月 20 日 12UTC, (c) 2000 年 2 月 21 日 00UTC, (d) 2000 年 2 月 21 日 12UTC, (e) 2000 年 2 月 22 日 00UTC。

中華民國89年02月20日09時MB色調強化雲圖



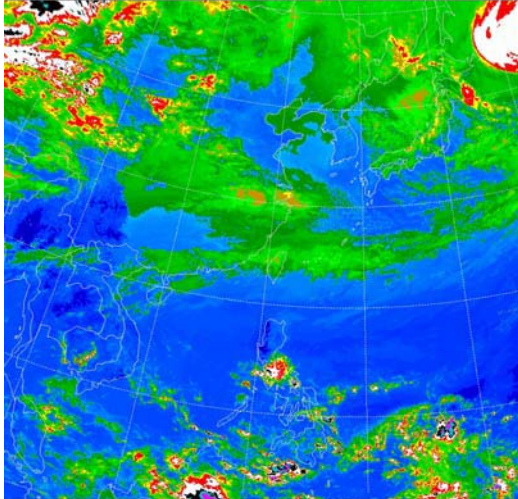
中央氣象局氣象衛星中心

中華民國89年02月21日09時MB色調強化雲圖



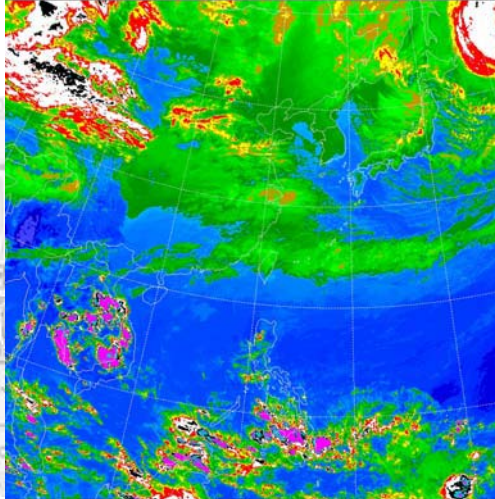
中央氣象局氣象衛星中心

中華民國89年02月21日12時MB色調強化雲圖



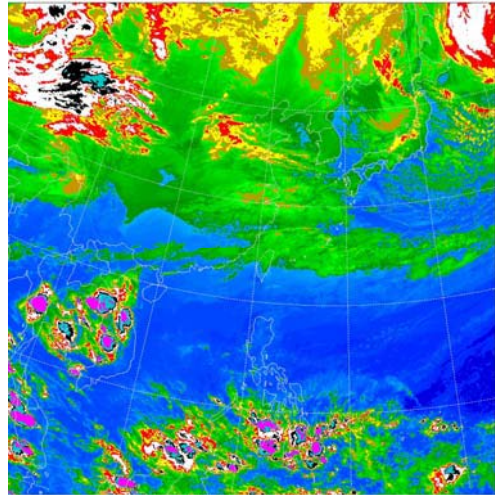
中央氣象局氣象衛星中心

中華民國89年02月21日17時MB色調強化雲圖



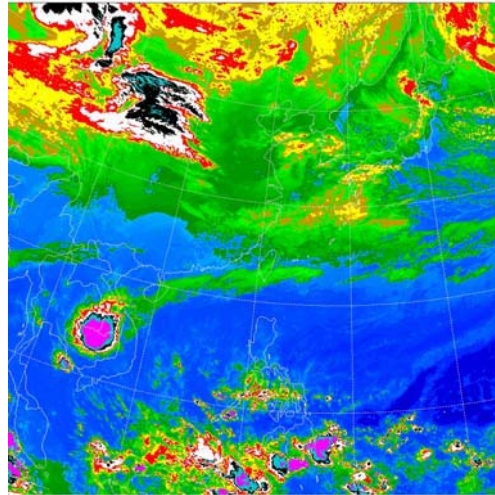
中央氣象局氣象衛星中心

中華民國89年02月21日21時MB色調強化雲圖



中央氣象局氣象衛星中心

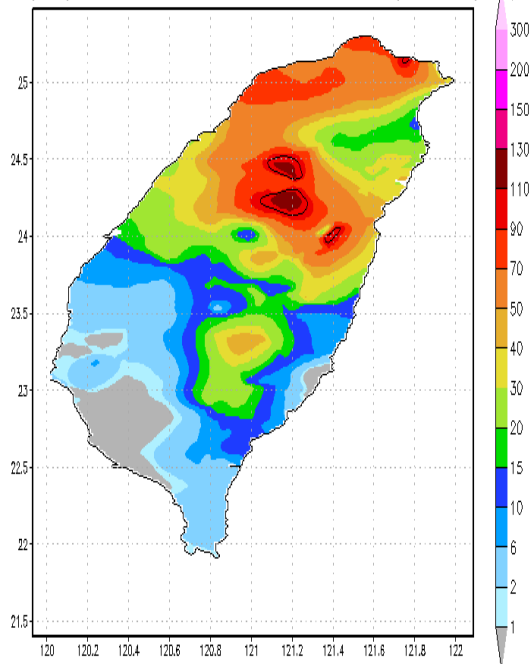
中華民國89年02月22日08時MB色調強化雲圖



中央氣象局氣象衛星中心

圖 3.3:中央氣象局 2000 年 2 月 20 日至 22 日紅外線色調強化圖

2000/02/20 00:00-24:00 Accumulated Precipitation (mm)



2000/02/21 00:00-24:00 Accumulated Precipitation (mm)

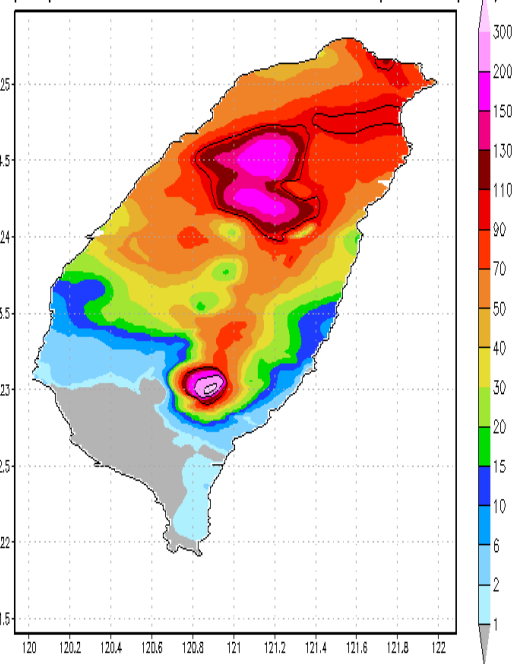


圖 3.4: 根據中央氣象局自動雨量觀測站所得 48 小時地面累積雨量圖。左圖為 2003 年 2 月 20 日 00:00 至 21 日 00:00，右圖為 2000 年 2 月 21 日 00:00 至 22 日 00:00。

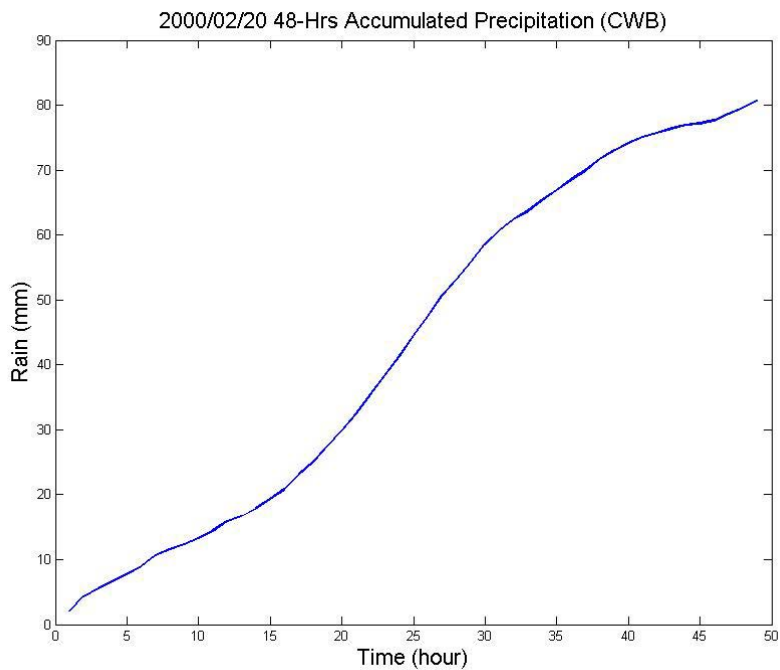
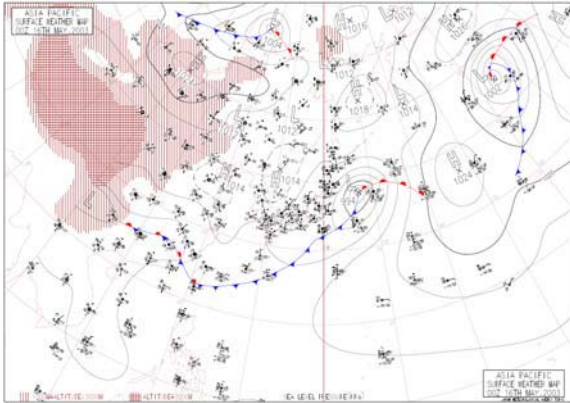
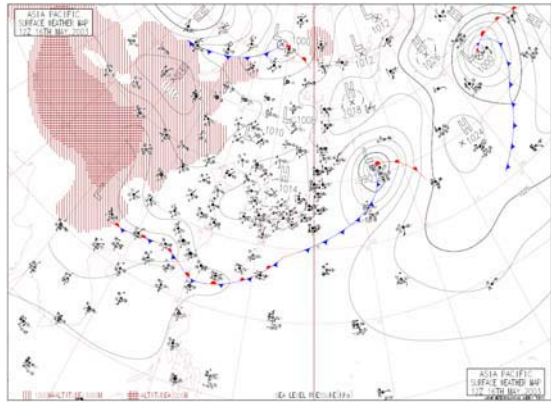


圖 3.5: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC 中央氣象局自動雨量觀測站 48 小時累積雨量圖。

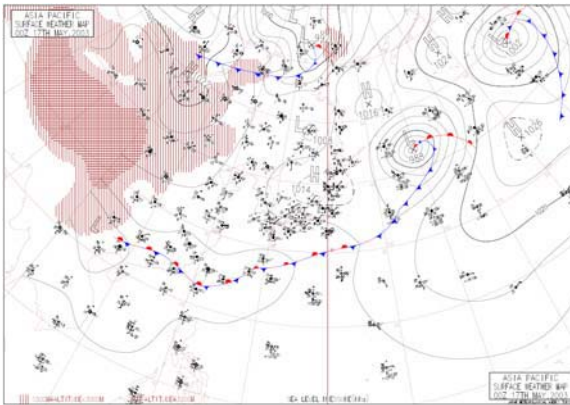
(a)



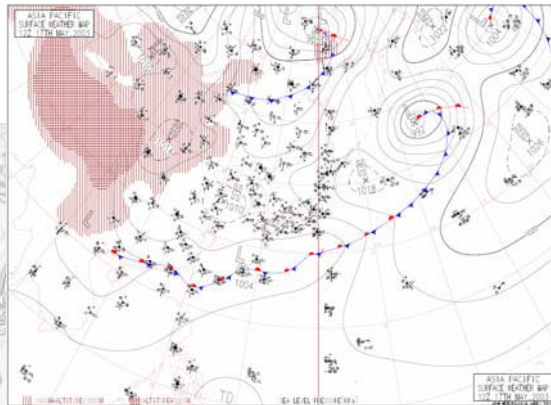
(b)



(c)



(d)



(e)

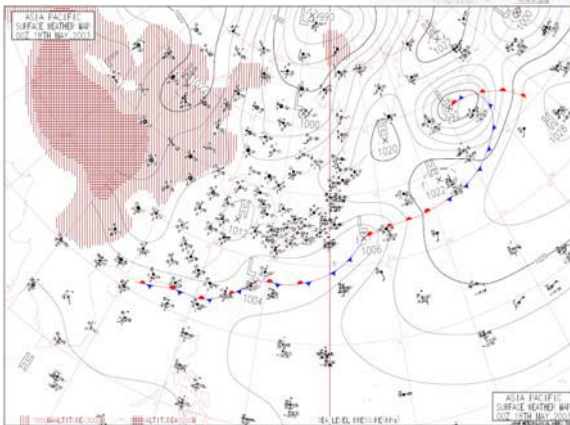
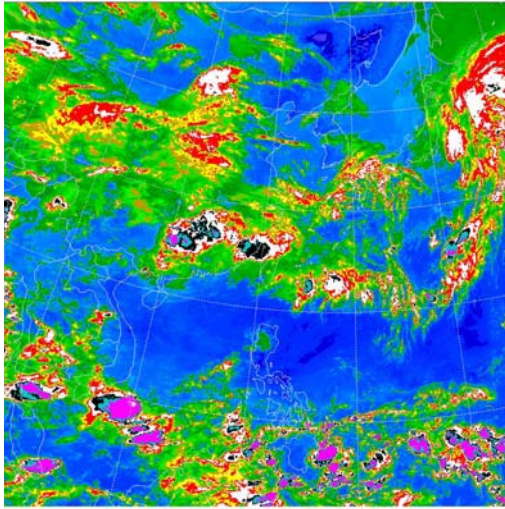


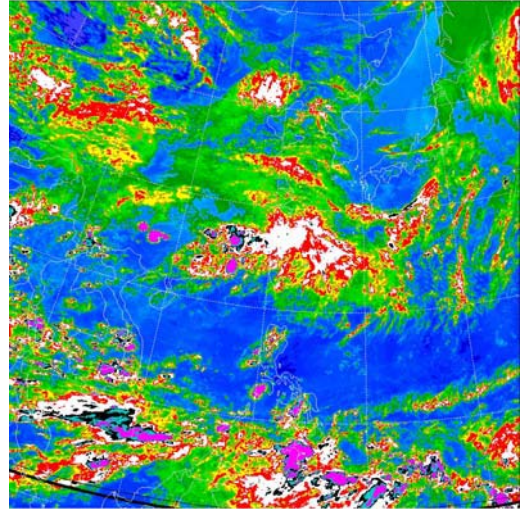
圖 3.6: 日本氣象廳綜觀地面天氣圖。(a) 2003 年 5 月 16 日 00UTC , (b) 2003 年 5 月 16 日 12UTC , (c) 2003 年 5 月 17 日 00UTC , (d) 2003 年 5 月 17 日 12UTC , (e) 2003 年 5 月 18 日 00UTC 。

中華民國92年05月16日09時MB色調強化雲圖



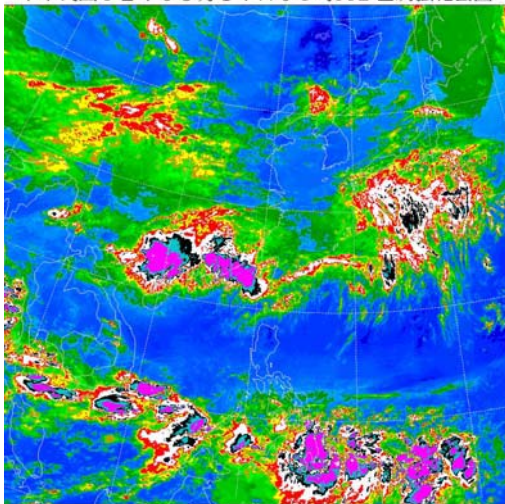
中央氣象局氣象衛星中心

中華民國92年05月16日17時MB色調強化雲圖



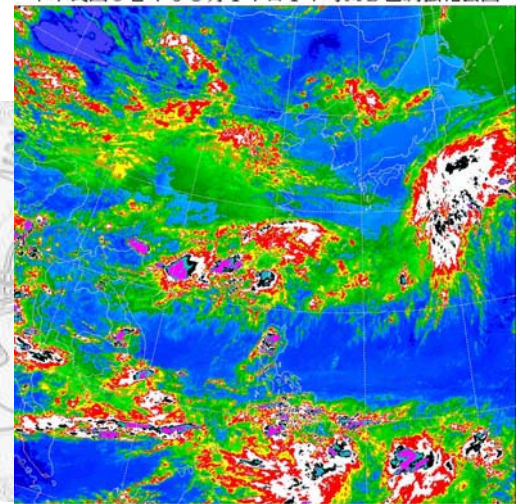
中央氣象局氣象衛星中心

中華民國92年05月17日09時MB色調強化雲圖



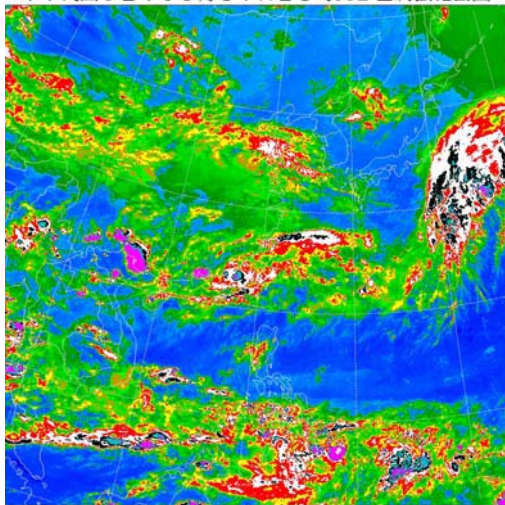
中央氣象局氣象衛星中心

中華民國92年05月17日17時MB色調強化雲圖



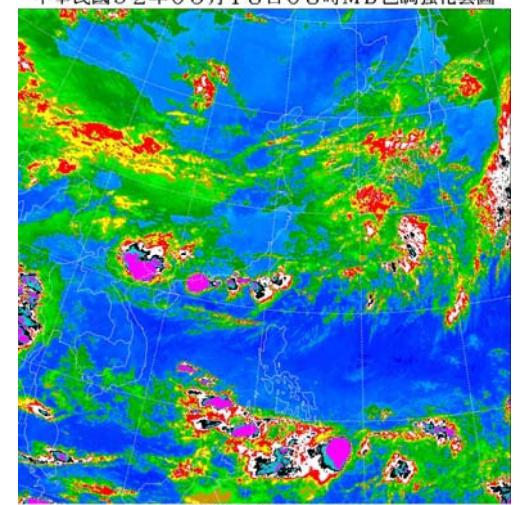
中央氣象局氣象衛星中心

中華民國92年05月17日21時MB色調強化雲圖



中央氣象局氣象衛星中心

中華民國92年05月18日08時MB色調強化雲圖



中央氣象局氣象衛星中心

圖 3.7: 中央氣象局 2003 年 5 月 16 日至 18 日紅外線色調強化圖

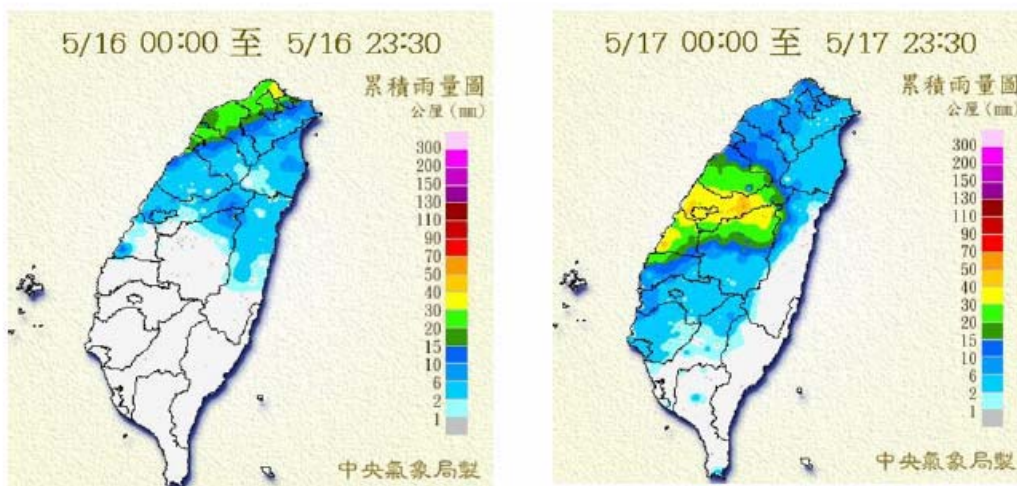


圖 3.8: 左圖為取自中央氣象局地面累積雨量圖 2003 年 2003 年 5 月 16 日 00:00 至 16 日 23:30，右圖為 2003 年 5 月 17 日 00:00 至 17 日 23:30

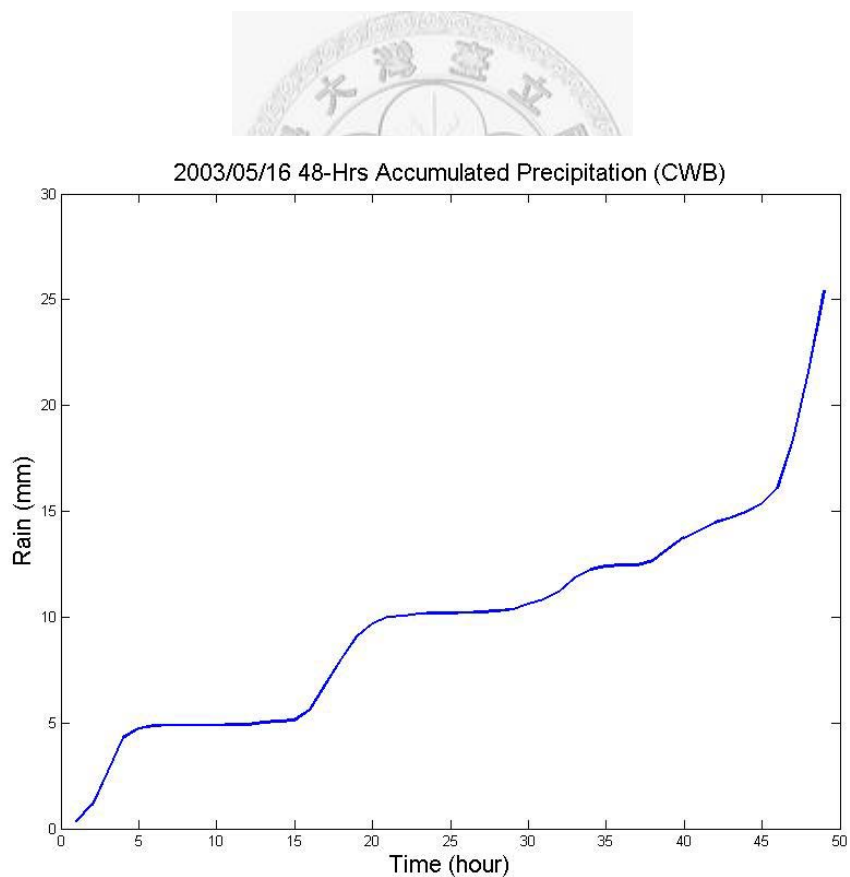


圖 3.9: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 至 18 日 00UTC 中央氣象局自動雨量觀測站 48 小時累積雨量圖。

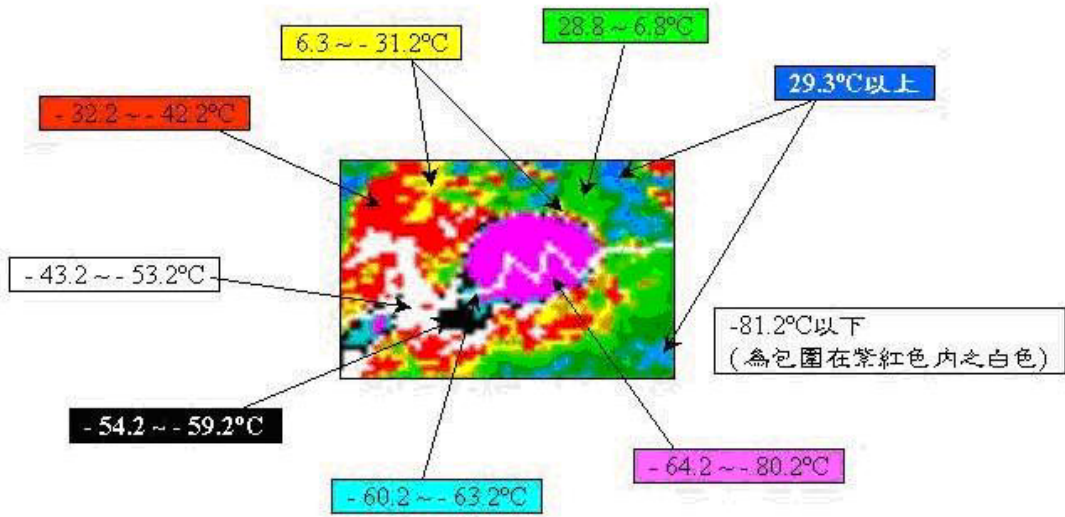


圖 3.10: 中央氣象局色調強化圖說明

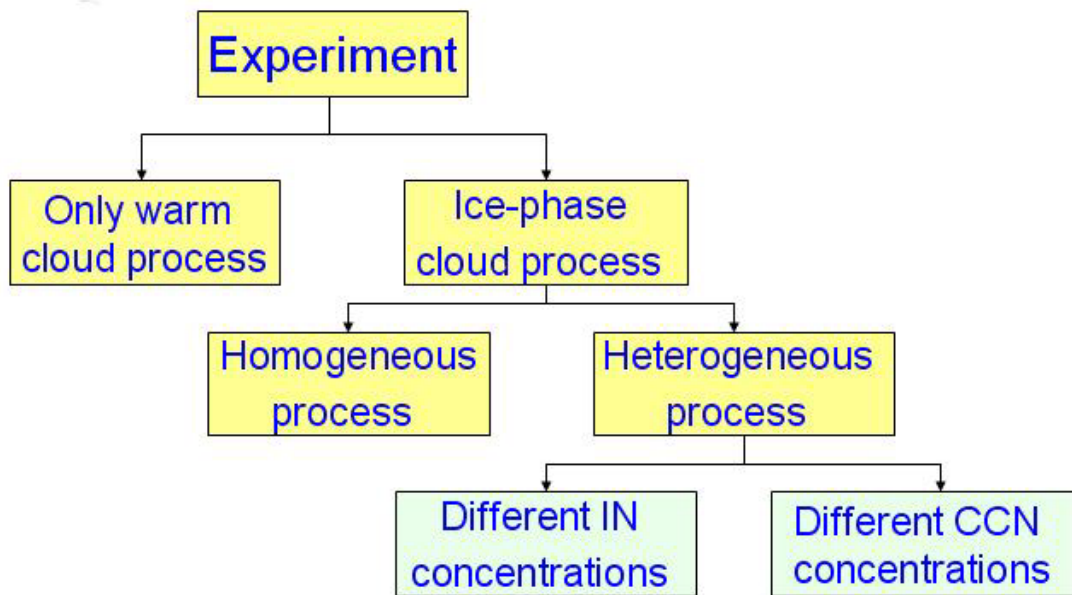


圖 3.11: 實驗設計簡圖

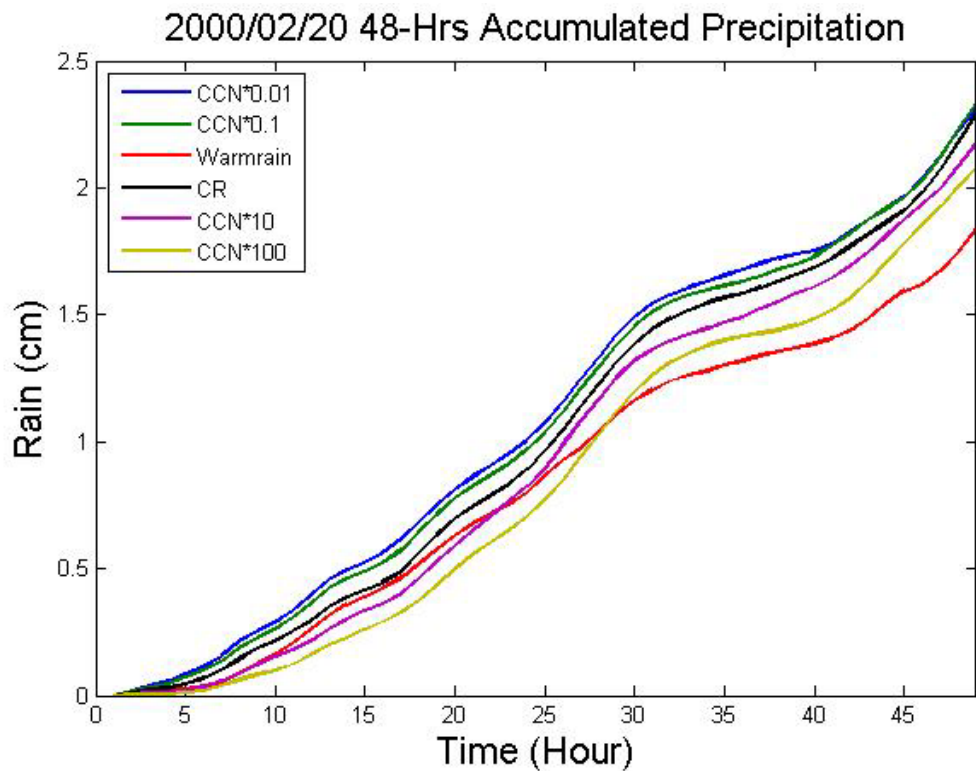


圖 4.1: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，更改 CCN 數量濃度所模擬出之 48 小時累積降雨量圖。

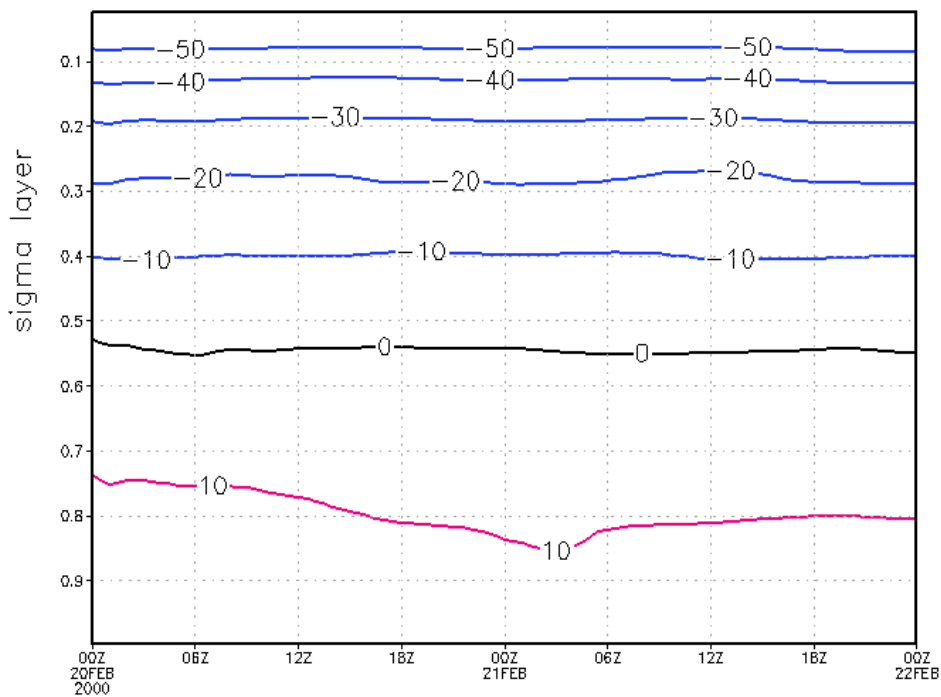
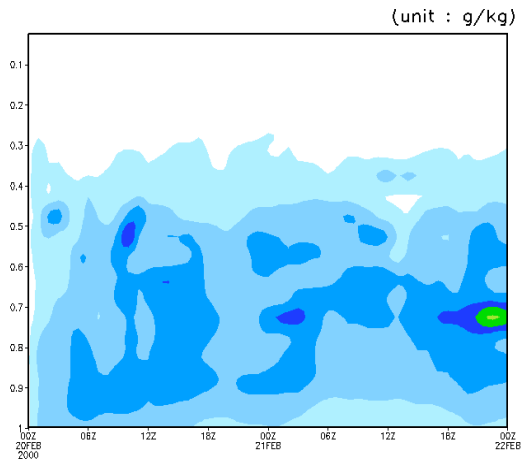
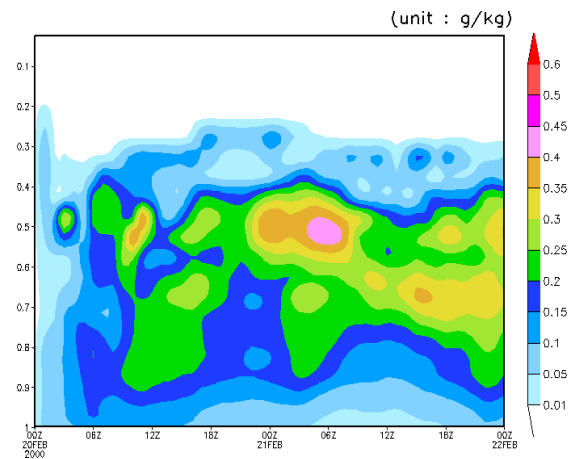


圖 4.2: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC 平均溫度模擬結果。

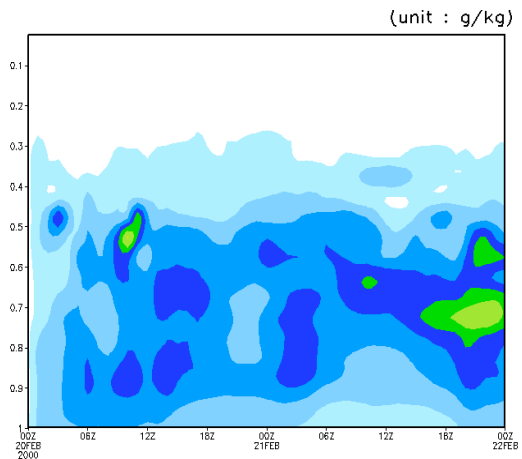
(a) CCN*0.01



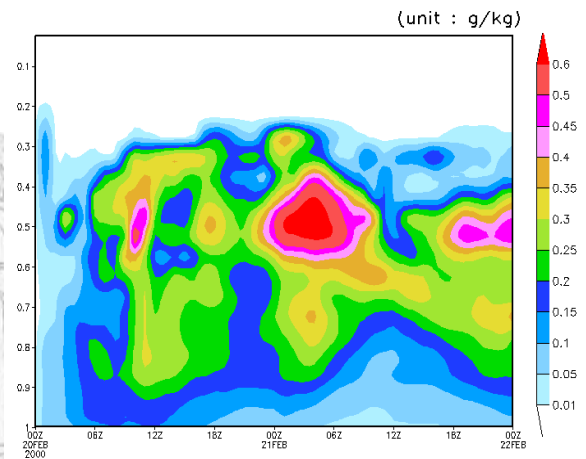
(d) CCN*10



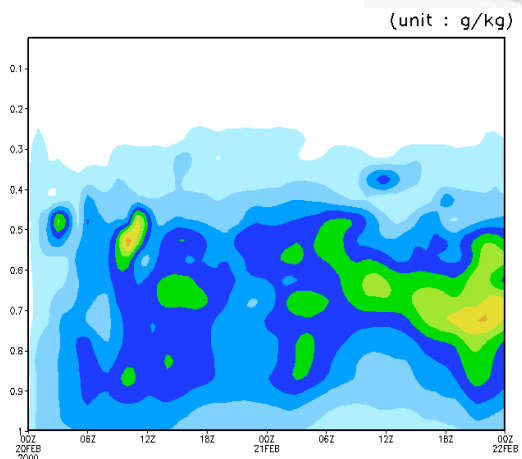
(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR



(f)

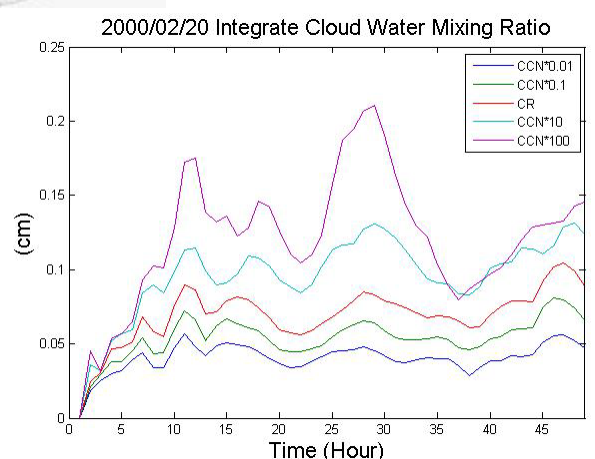
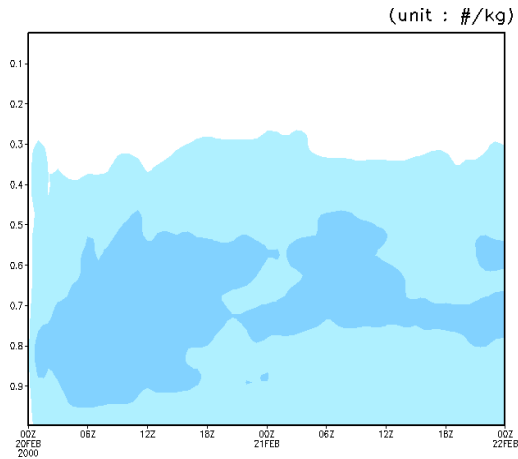
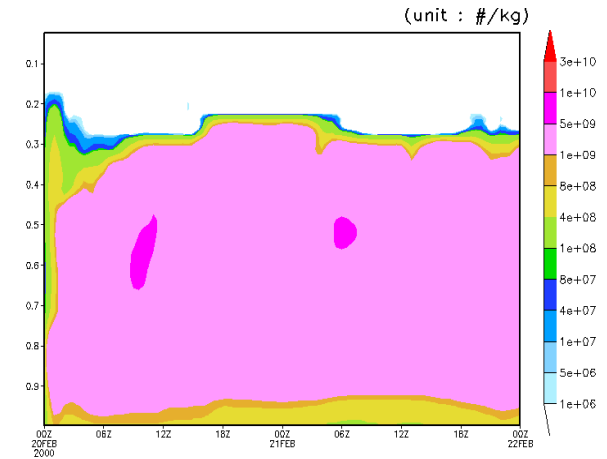


圖 4.3: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，在 IN 濃度固定下，雲水混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100; (f) 整層雲水厚度。

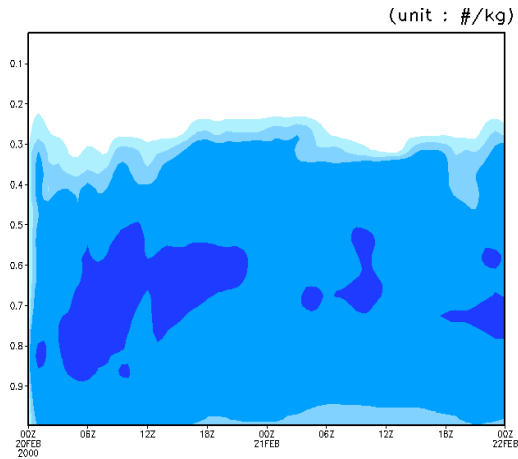
(a) CCN*0.01



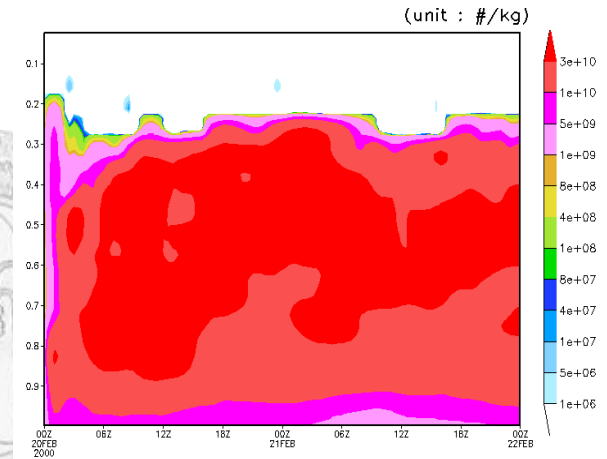
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

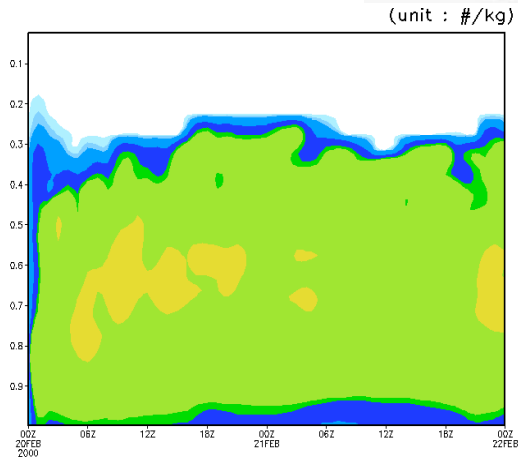
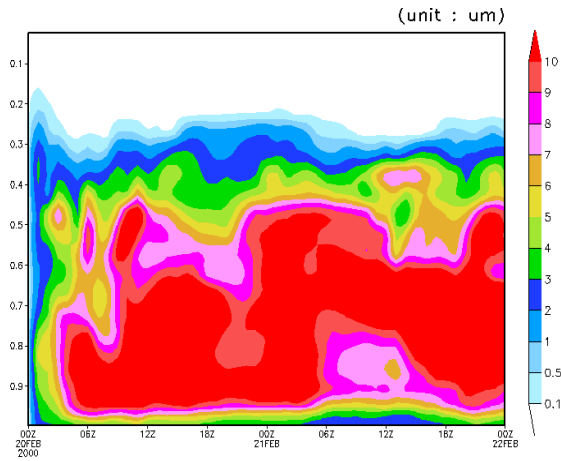
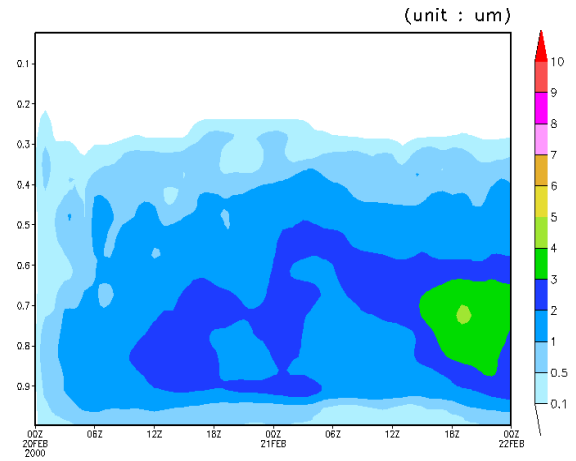


圖 4.4: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雲滴數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

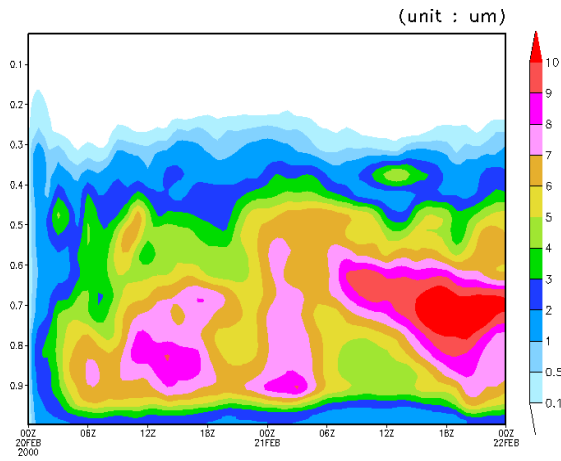
(a) CCN*0.01



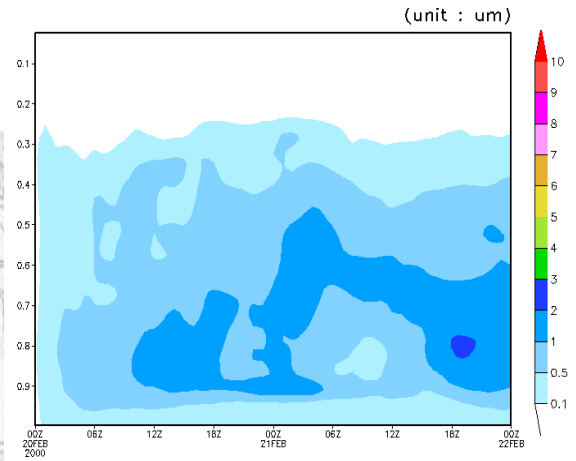
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

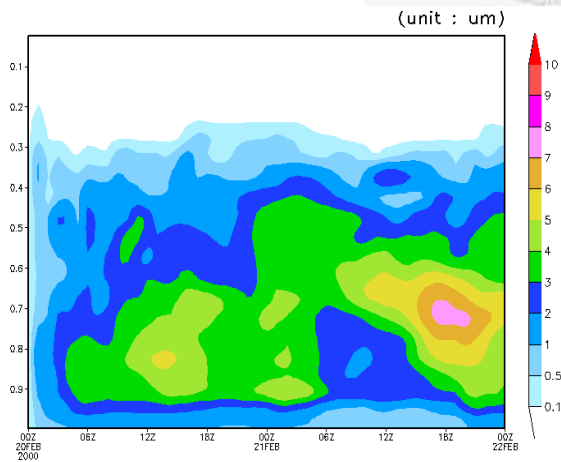
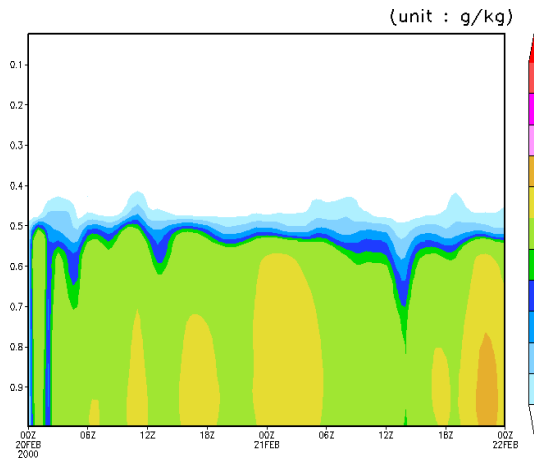
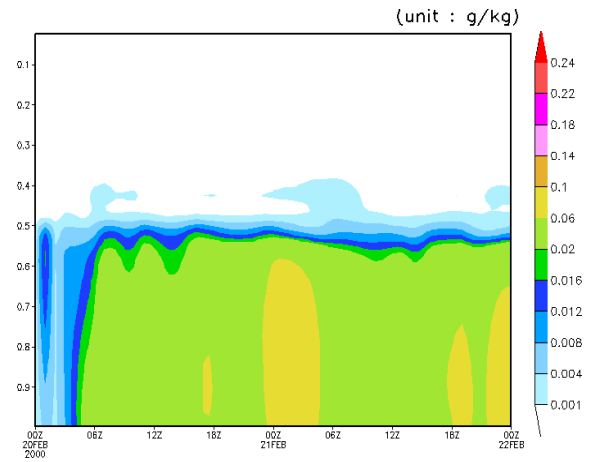


圖 4.5: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雲滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

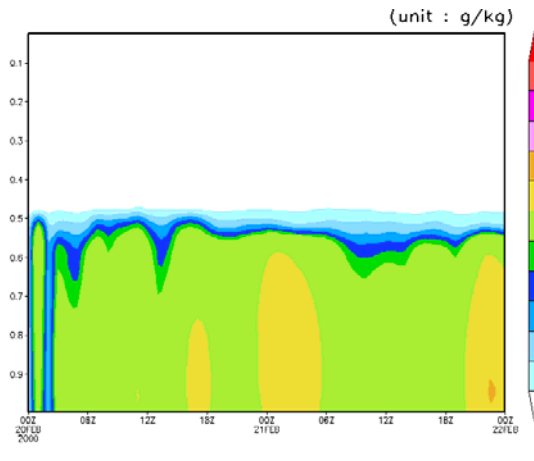
(a) CCN*0.01



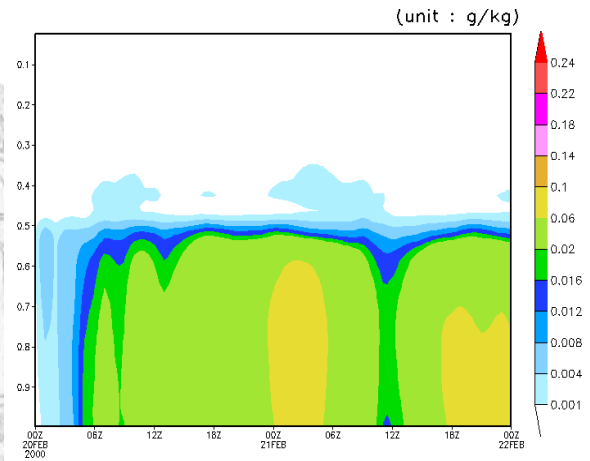
(d) CCN*10



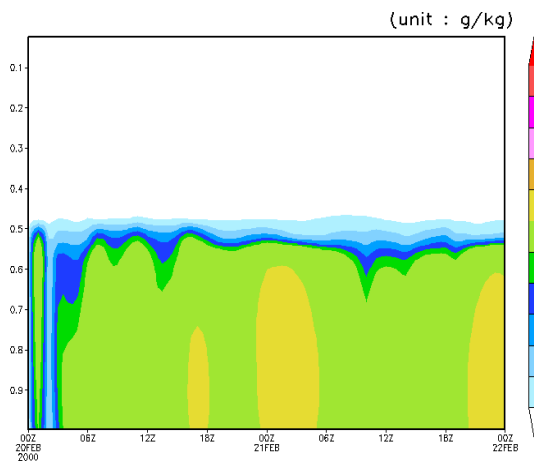
(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR



(f)

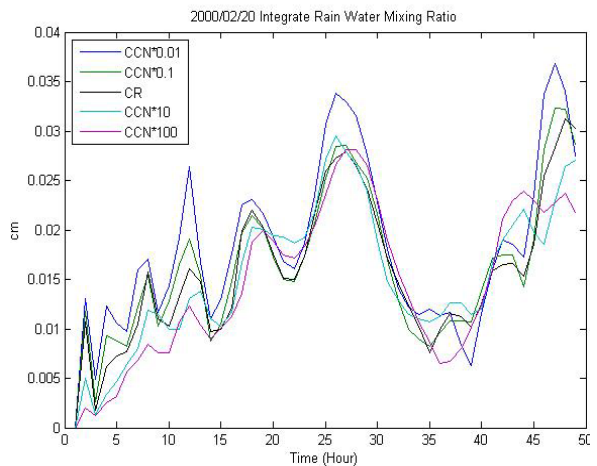
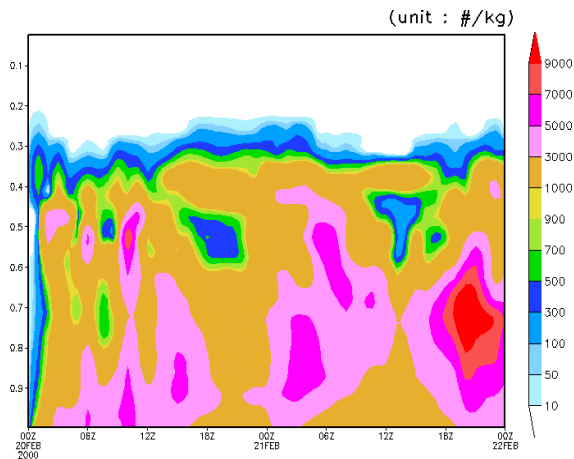
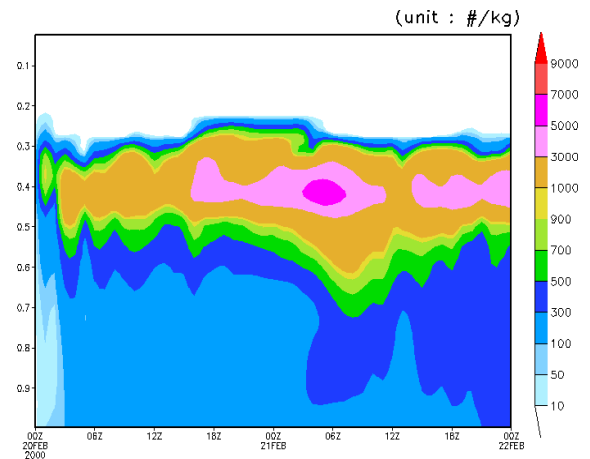


圖 4.6: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，在 IN 濃度固定下，雨水混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100; (f) 整層雨水厚度。

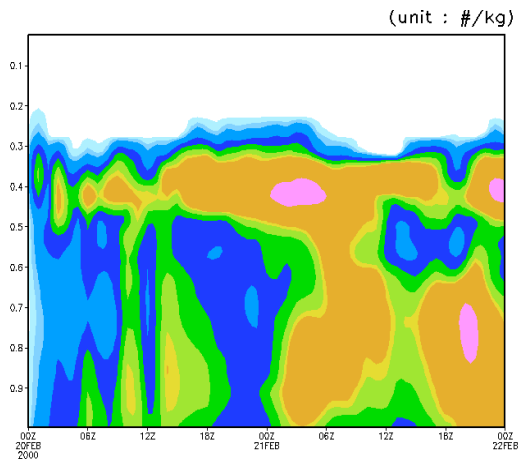
(a) CCN*0.01



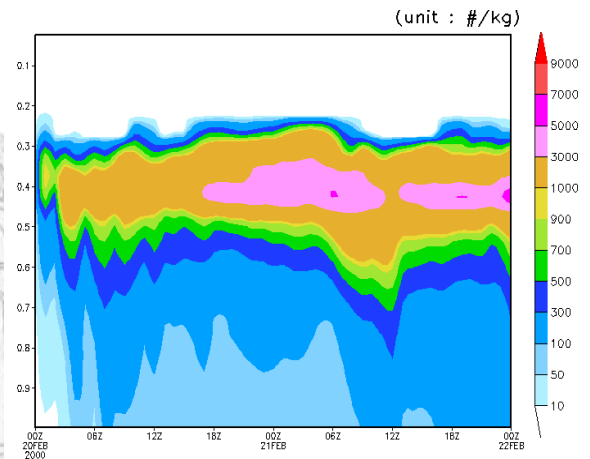
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

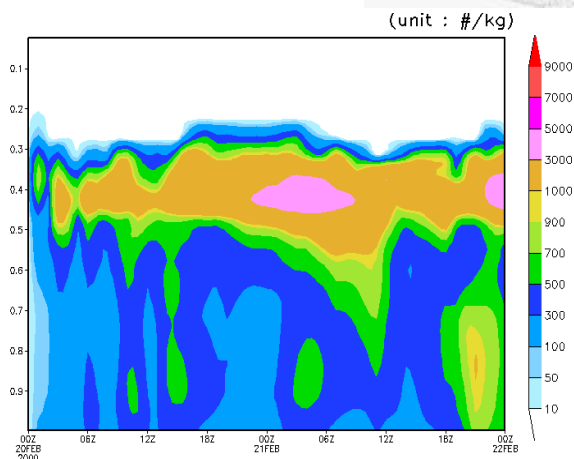
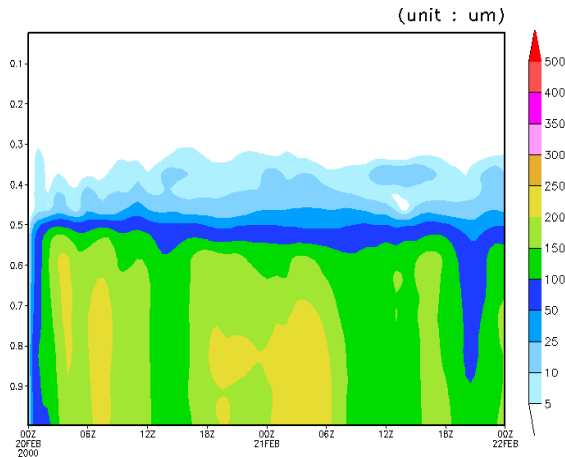
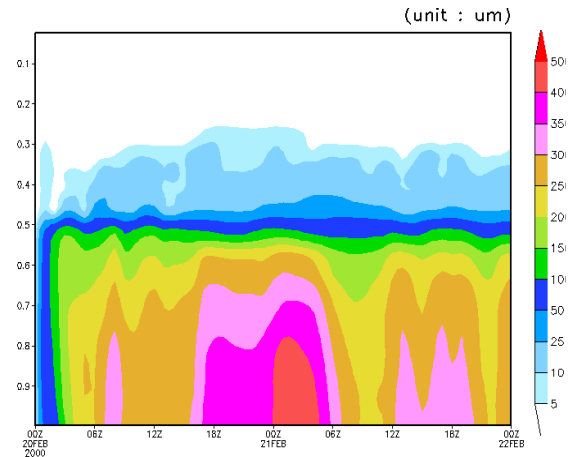


圖 4.7: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雨滴數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

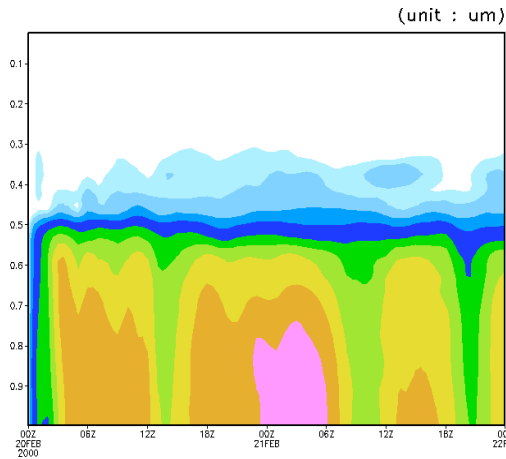
(a) CCN*0.01



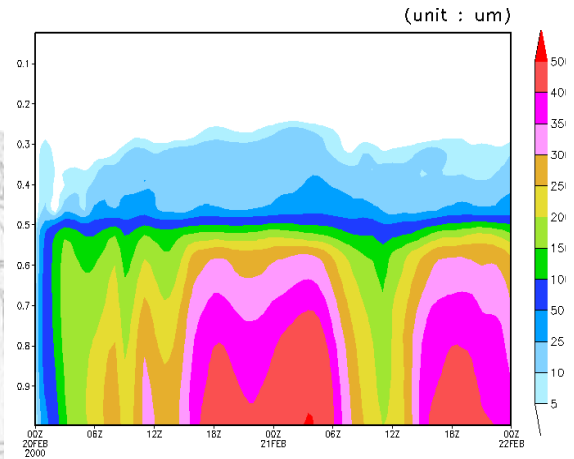
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

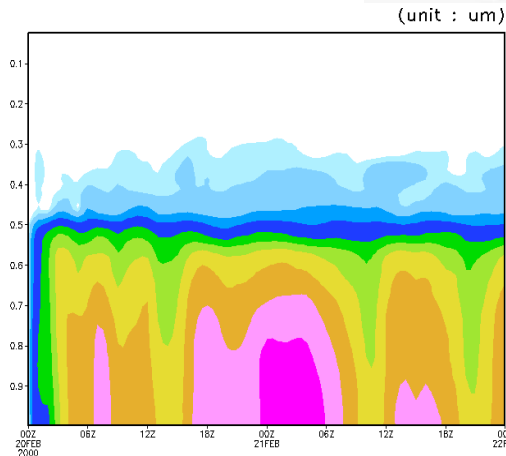
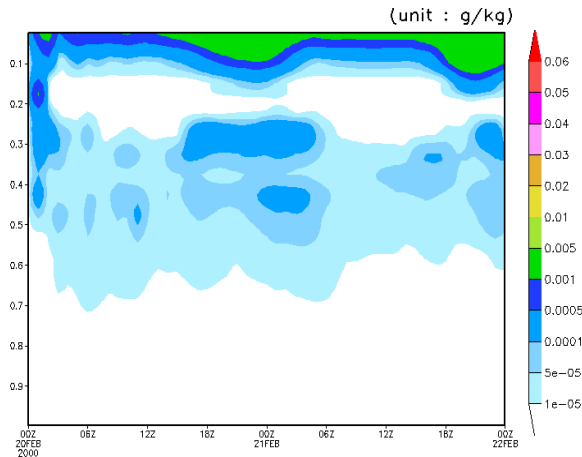
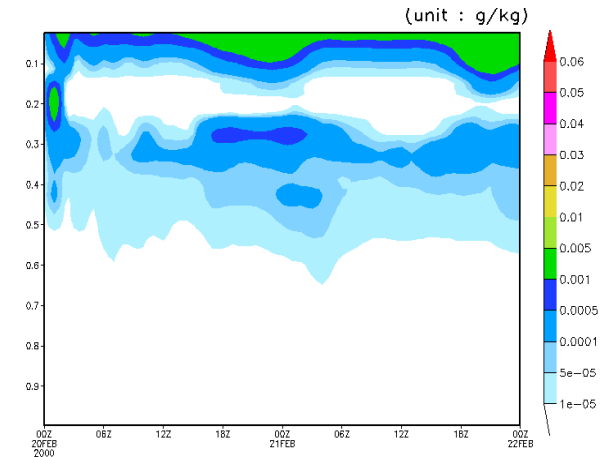


圖 4.8: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雨滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

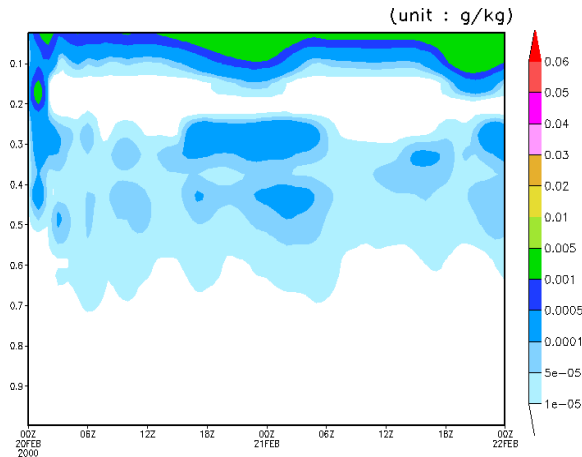
(a) CCN*0.01



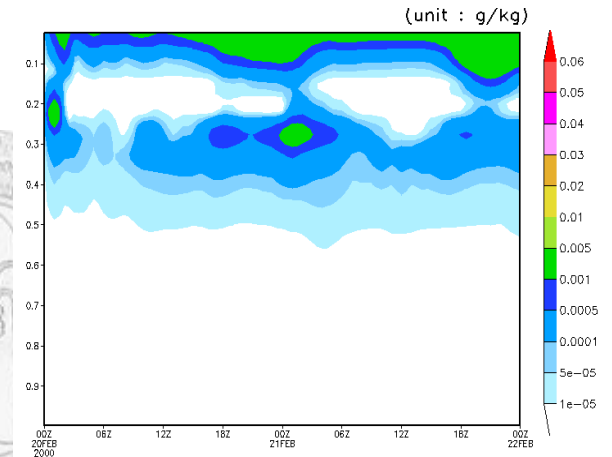
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

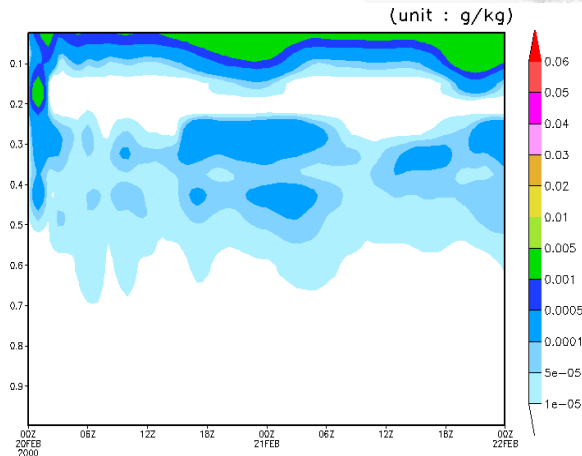
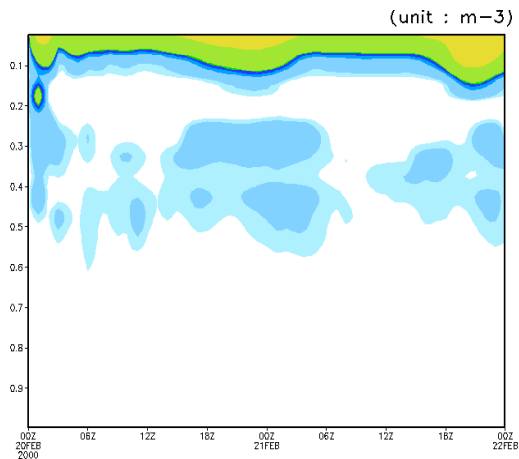
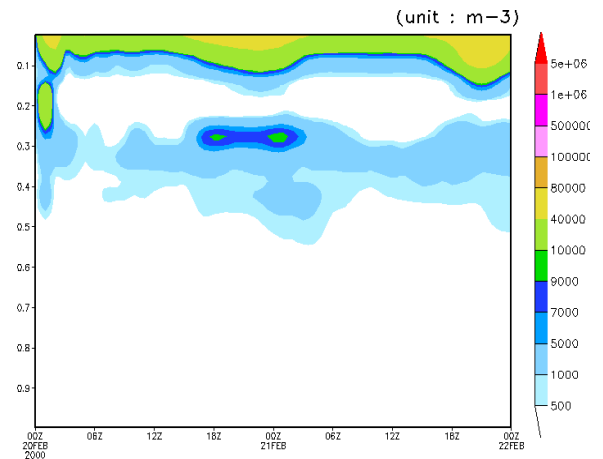


圖 4.9: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雲冰混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

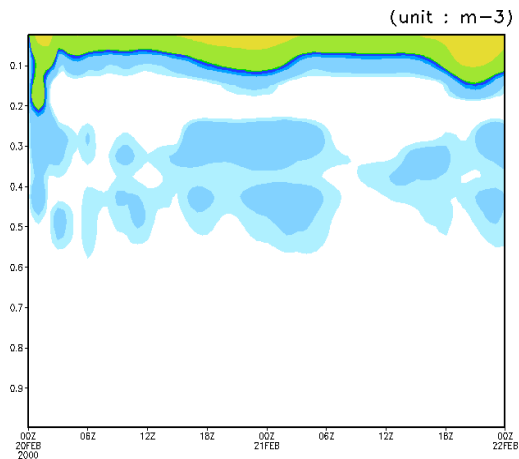
(a) CCN*0.01



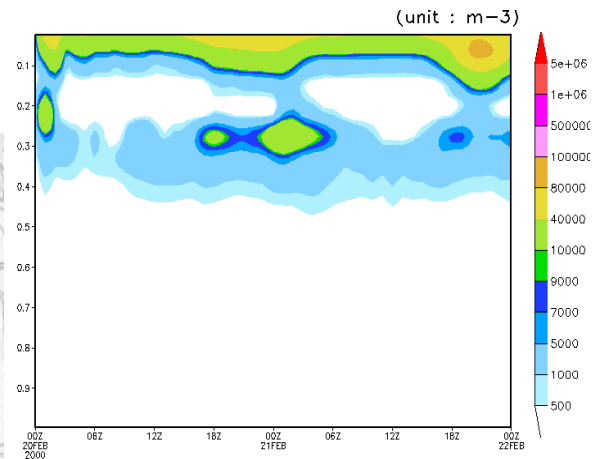
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

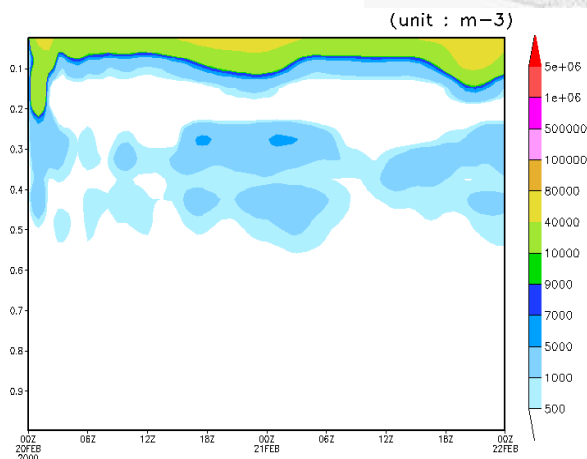


圖 4.10: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 冰晶的數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。 (a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

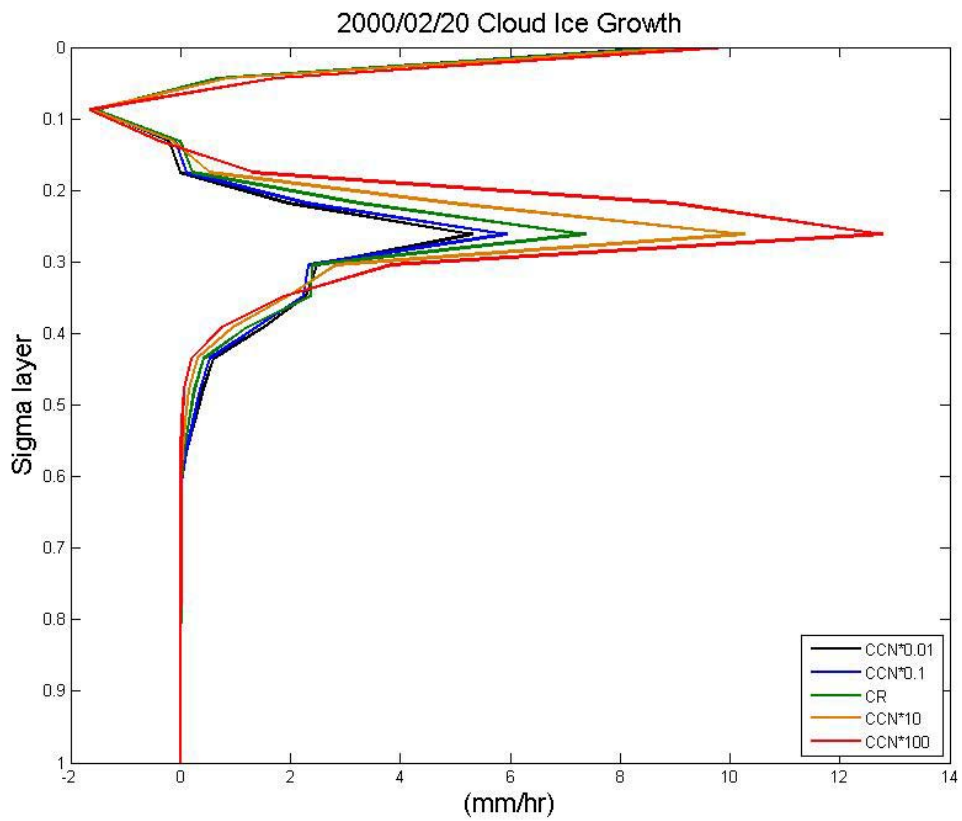
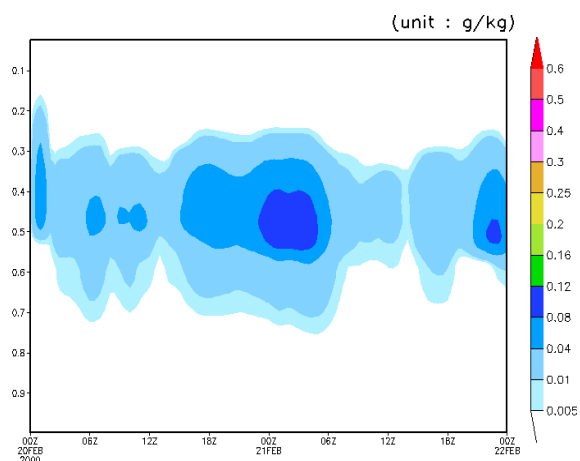
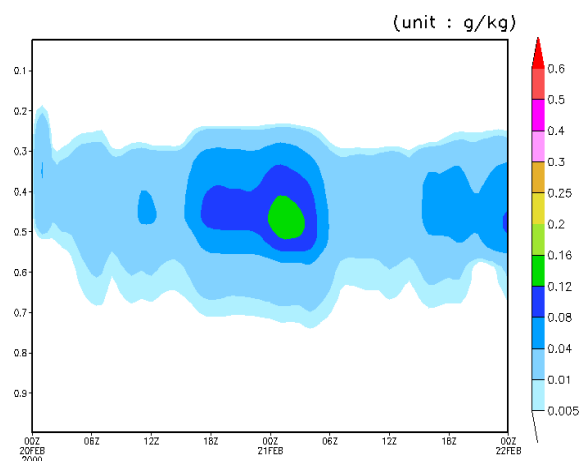


圖 4.11: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 IN 濃度固定下，雲冰生長率垂直分布圖。

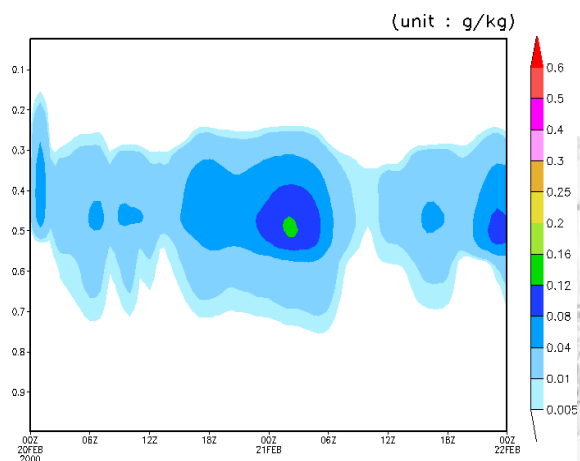
(a) CCN*0.01



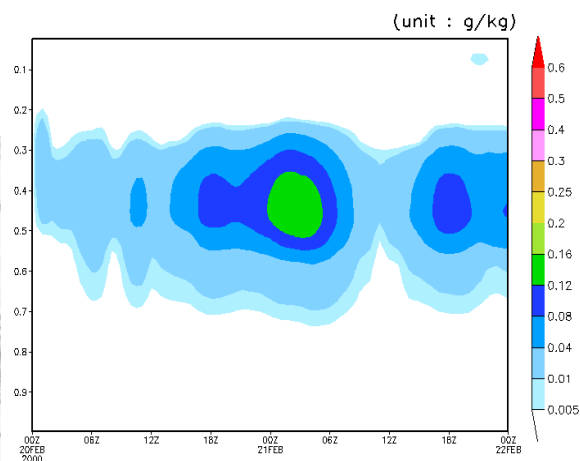
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

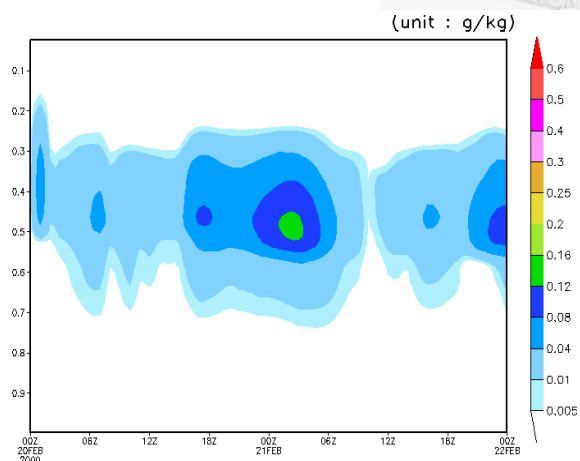
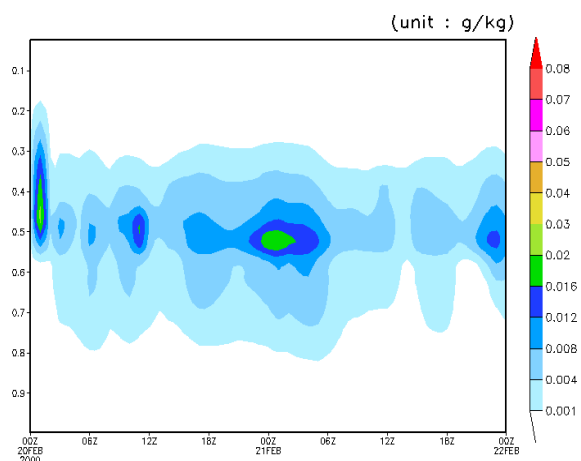
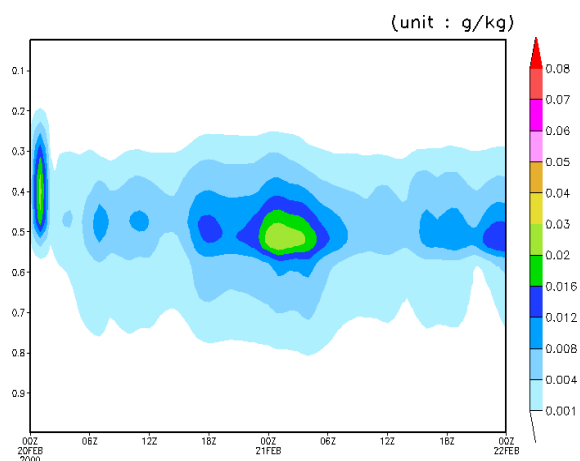


圖 4.12: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雪混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。
(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

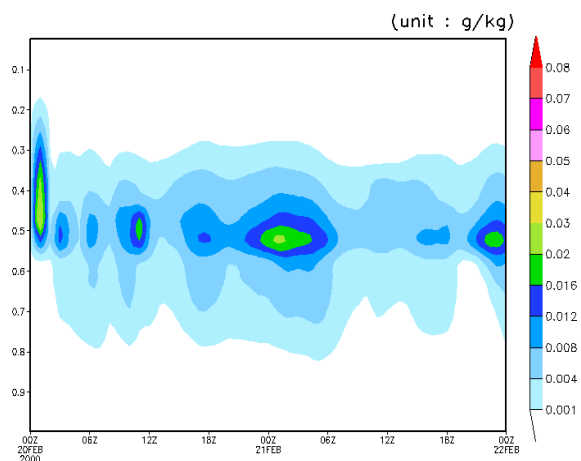
(a) CCN*0.01



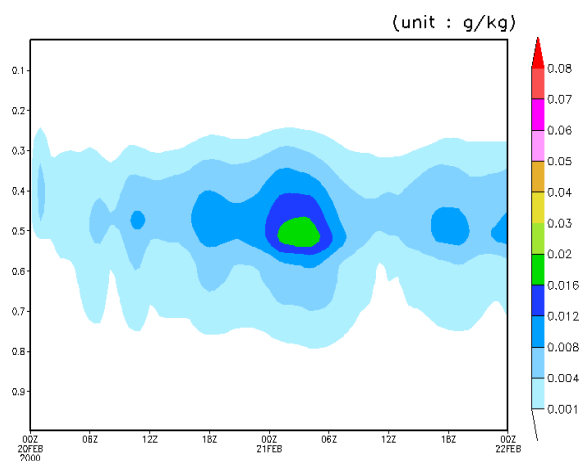
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

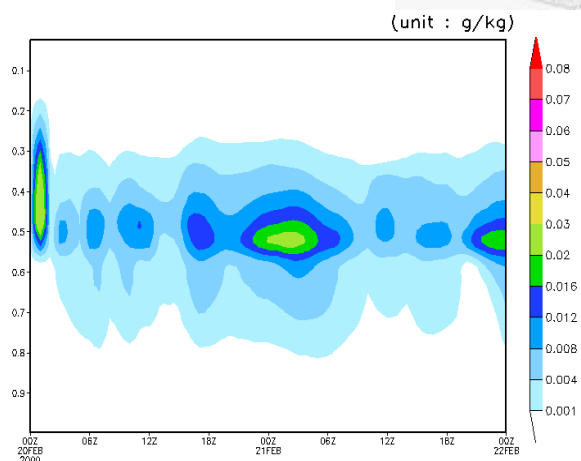


圖 4.13: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 電混比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。 (a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

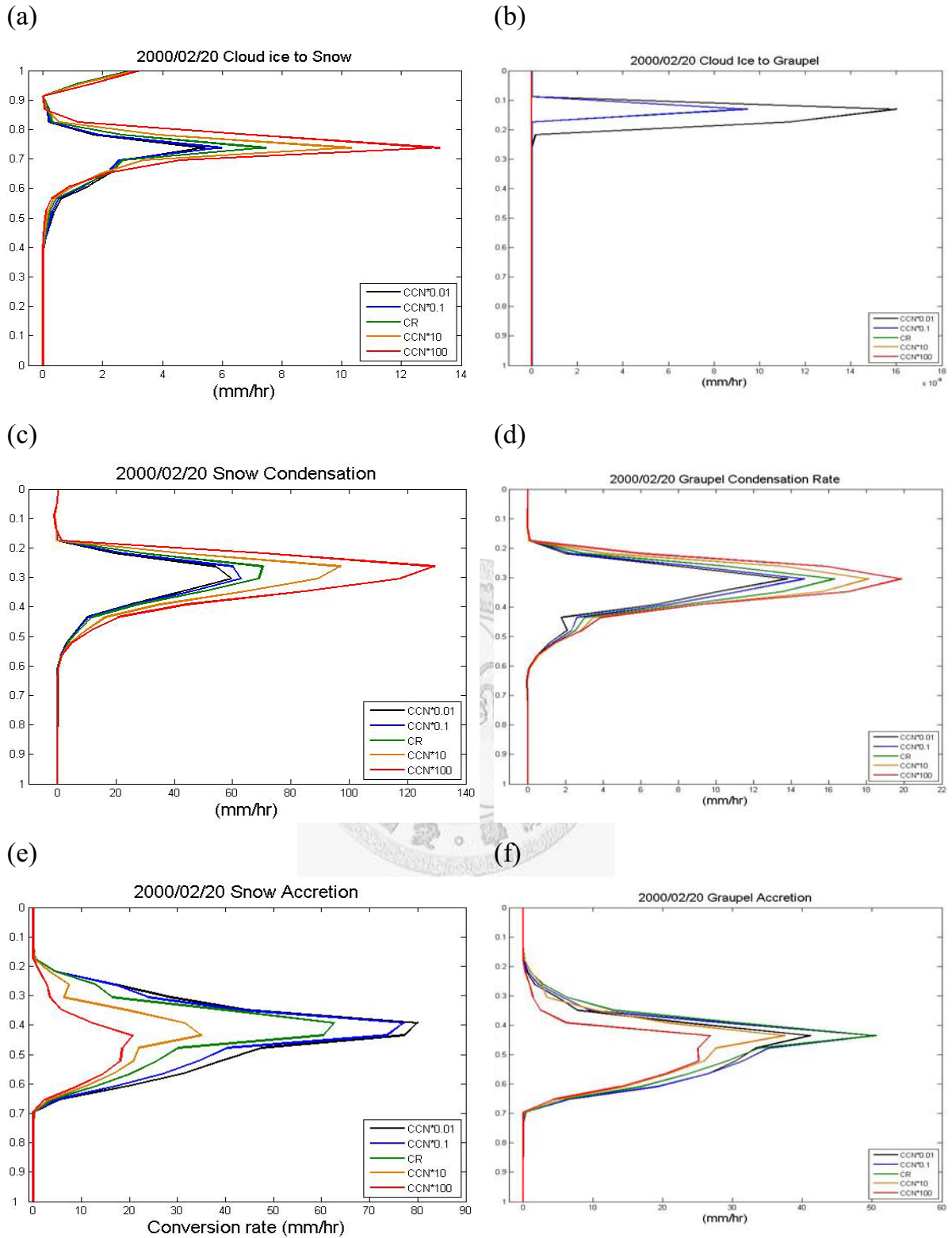
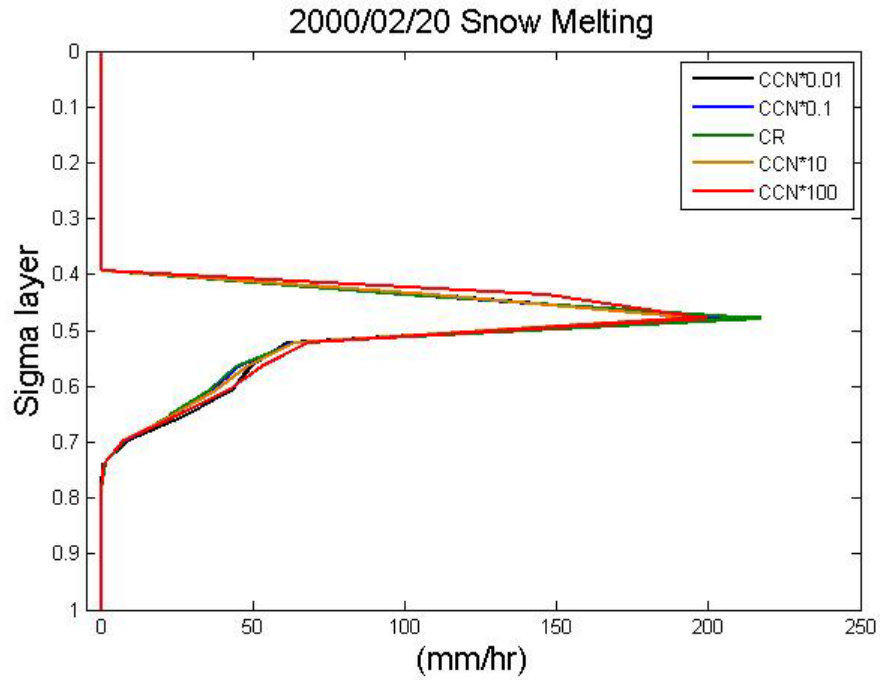
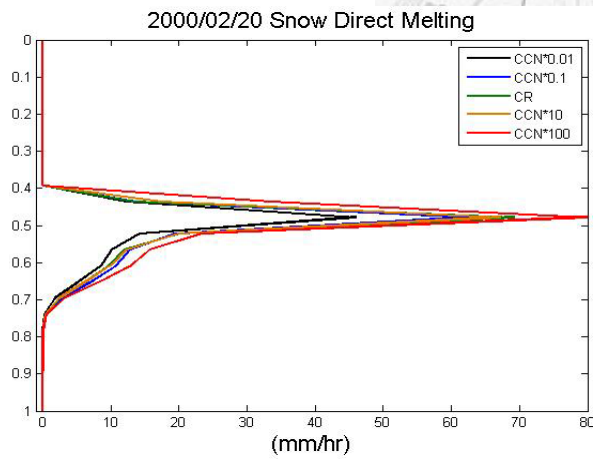


圖 4.14: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 IN 濃度固定下，(a)雲冰轉換成雪的生長率垂直分布圖;(b)雲冰轉換成電的生長率垂直分布圖;(c)雪凝結生長率; (d)電凝結生長率; (e)雪撞併過程生長率;(f)電撞併過程生長率。

(a)



(b)



(c)

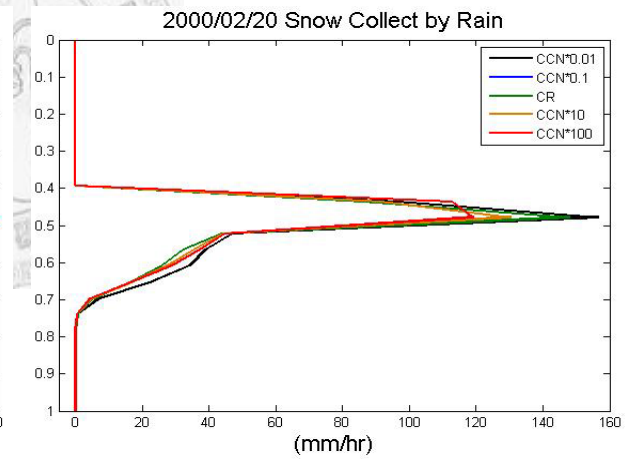
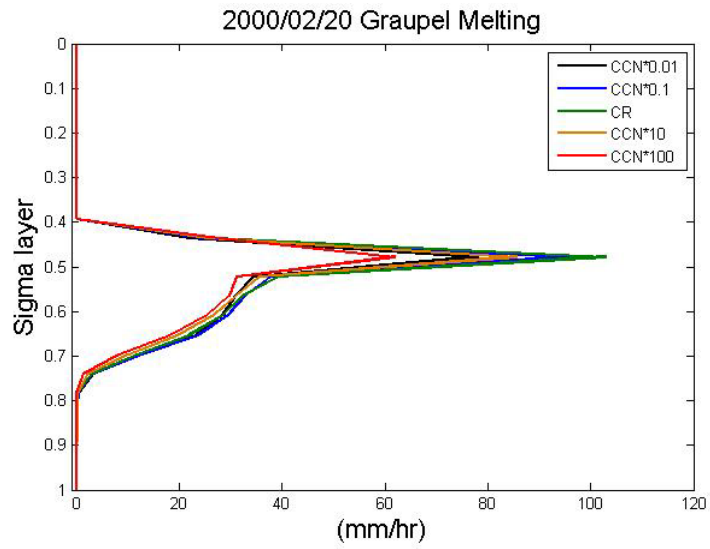
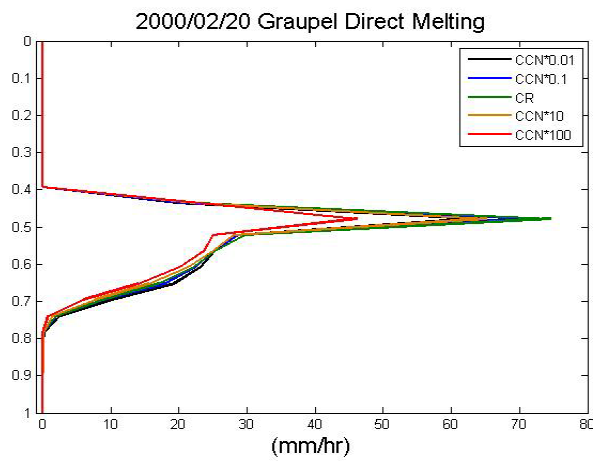


圖 4.15: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 IN 濃度固定下，(a)雪的總融化率;(b)雪的直接融化率;(c)融化的雪被雨滴收集的效率。

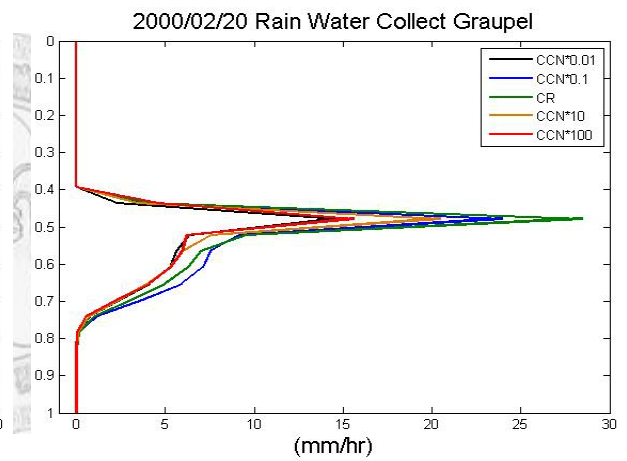
(a)



(b)



(c)



(d)

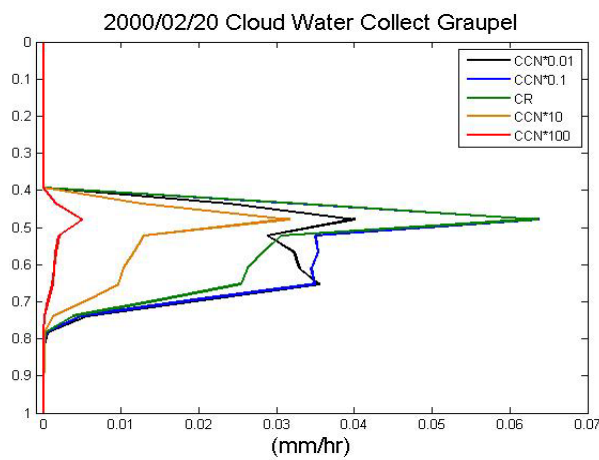


圖 4.16: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 IN 濃度固定下，(a)電的總融化率;(b)電的直接融化率;(c)融化的電被雨滴收集的效率;(d)融化的電被雲滴收集的效率。

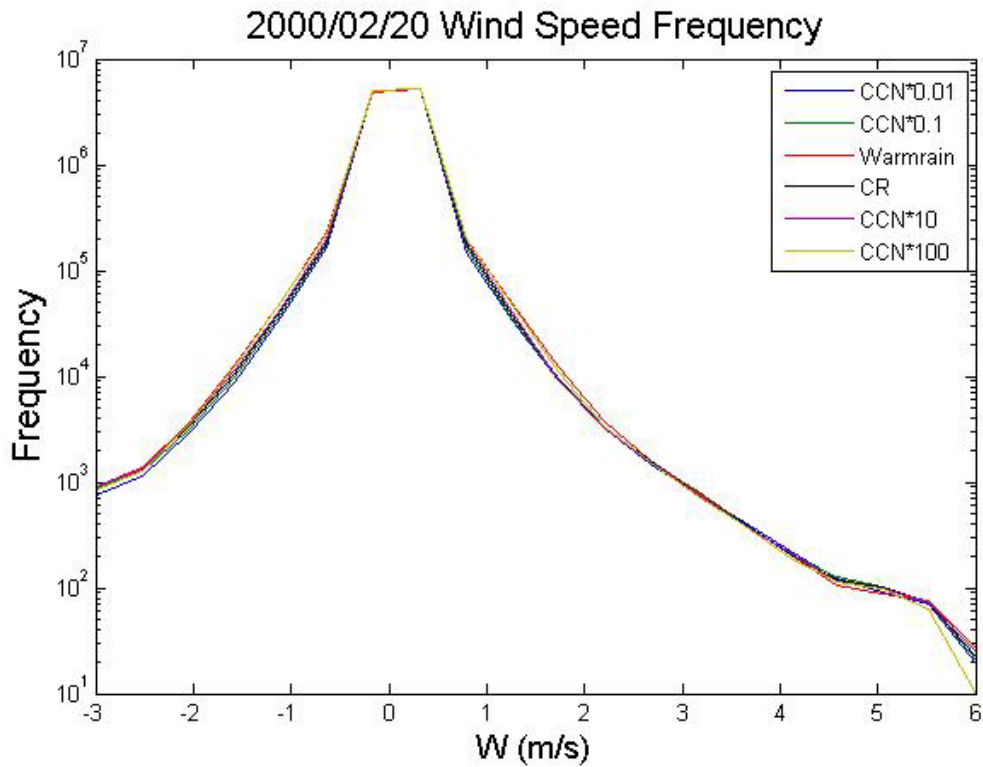


圖 4.17: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，更改 CCN 數量濃度所模擬出在 48 小時內，-3 m/s ~ 6 m/s 每 0.5m/s 為一個區間，計算所有區間內風速出現的次數。

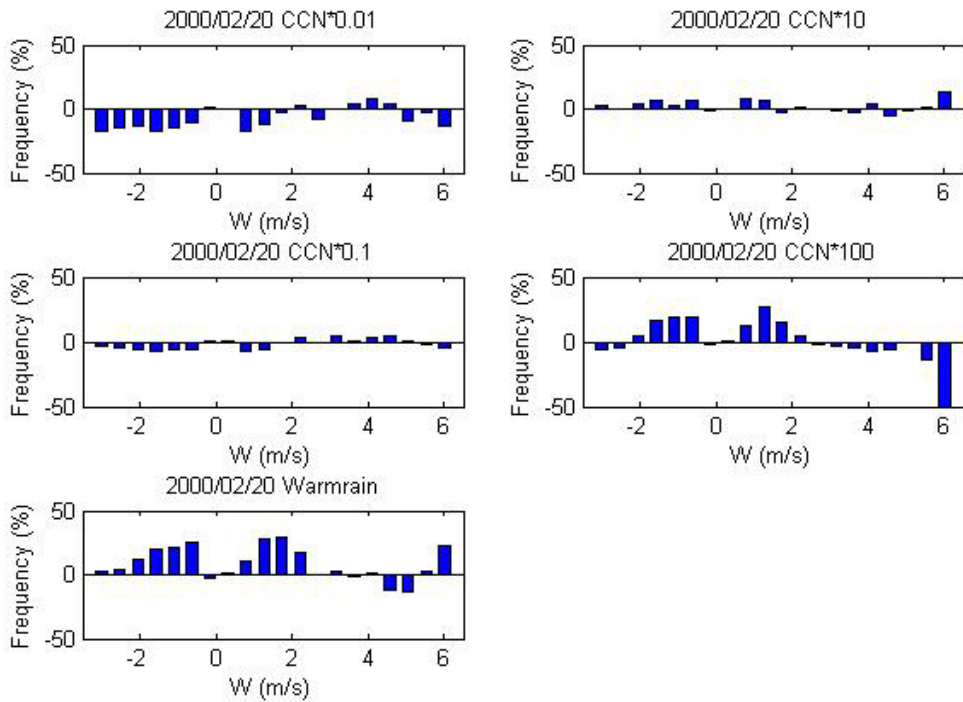
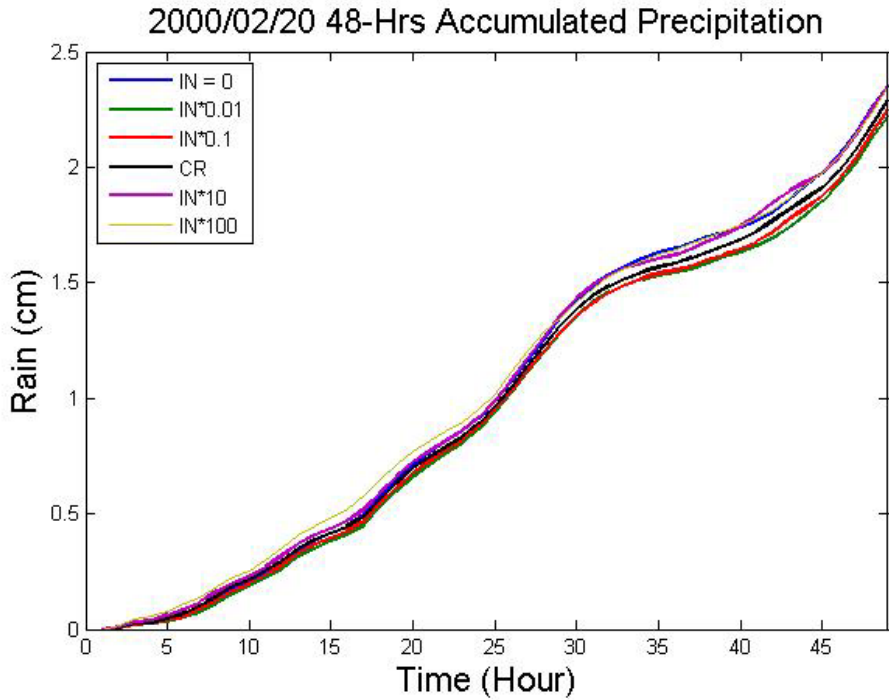


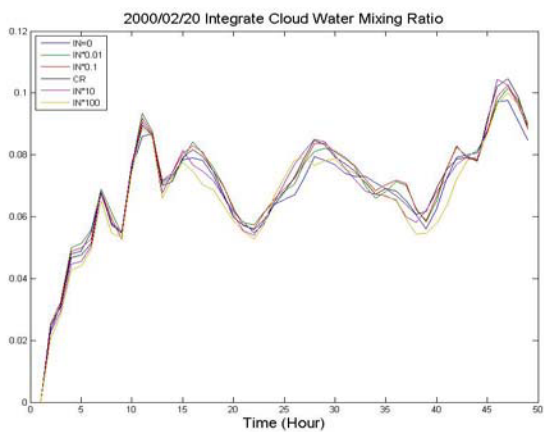
圖 4.18: 承圖 4.15，以 CR 為基準值所做出之距平圖。



	IN = 0	IN*0.01	IN*0.1	CR	IN*10	IN*100
Rain (cm)	2.35174	2.22036	2.24936	2.28832	2.35463	2.34238

圖 4.19: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 更改 IN 數量濃度所模擬出之 48 小時累積降雨量圖。

(a)



(b)

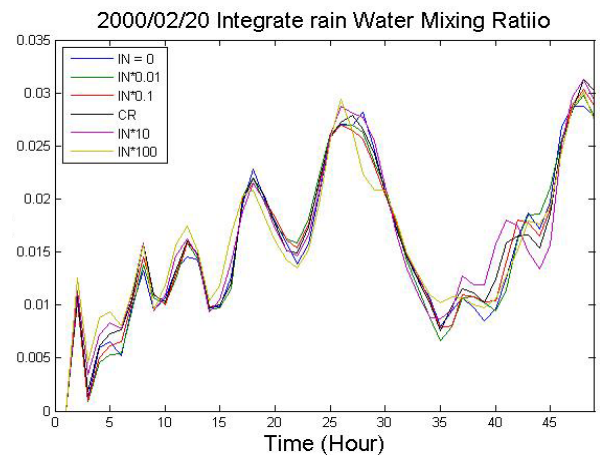
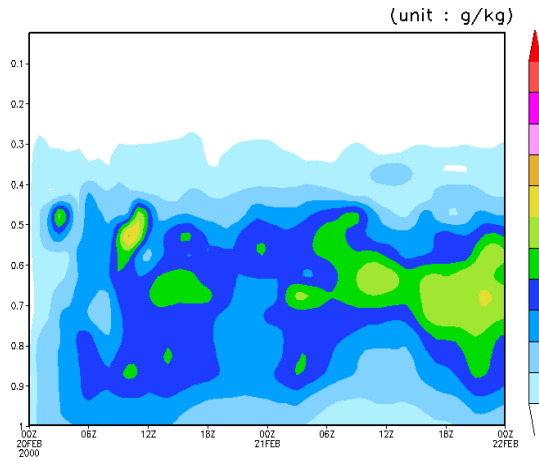
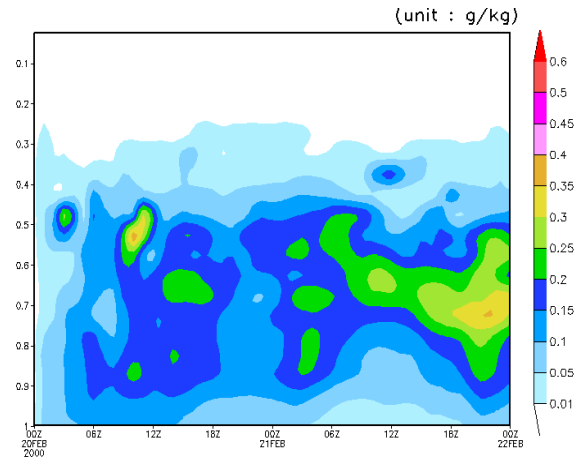


圖 4.20: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 更改 IN 數量濃度所模擬(a) 整層雲水厚度; (b) 整層雨水厚度。

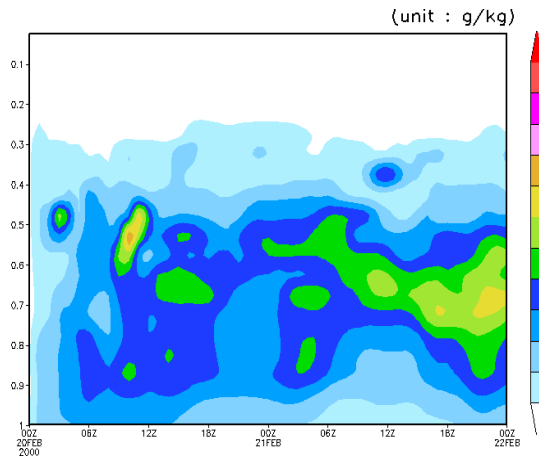
(a) $IN = 0$



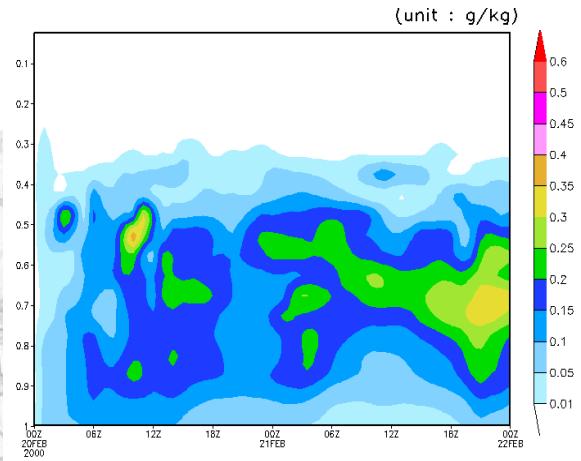
(d) CR



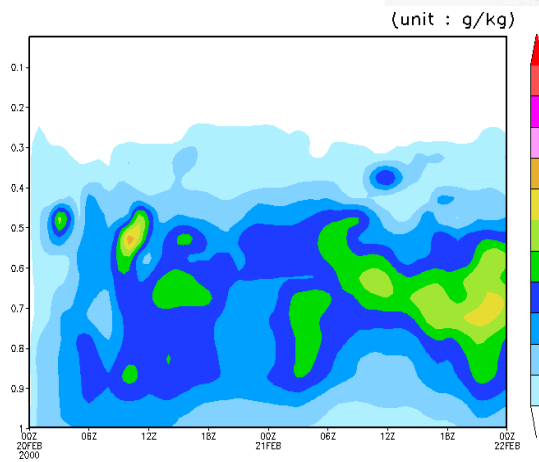
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

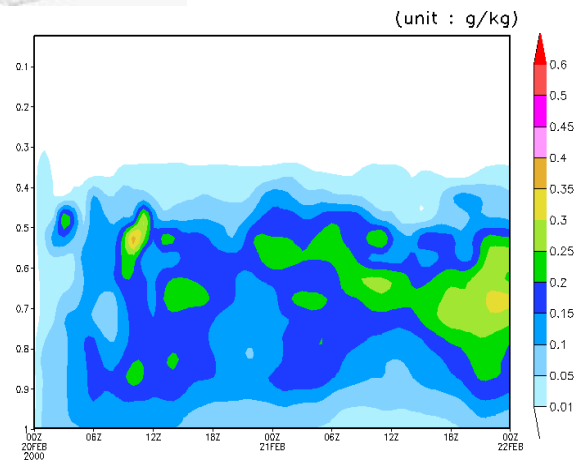
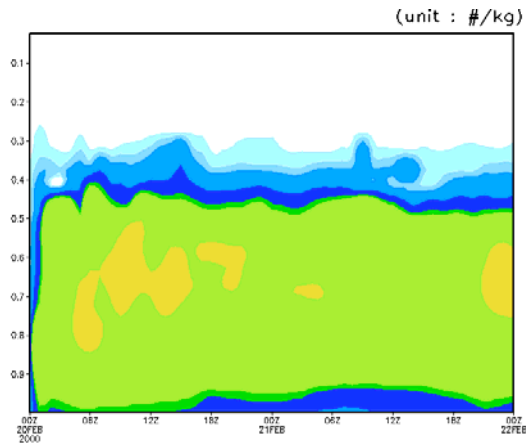
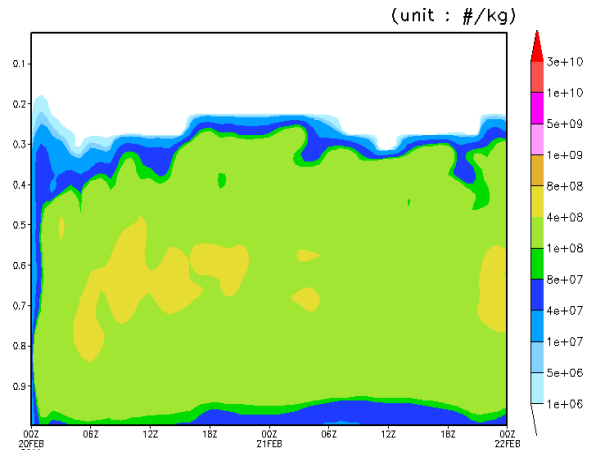


圖 4.21: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 雲水混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) $IN = 0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

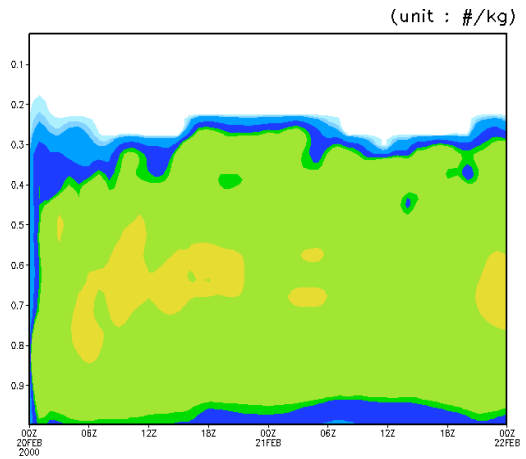
(a) IN = 0



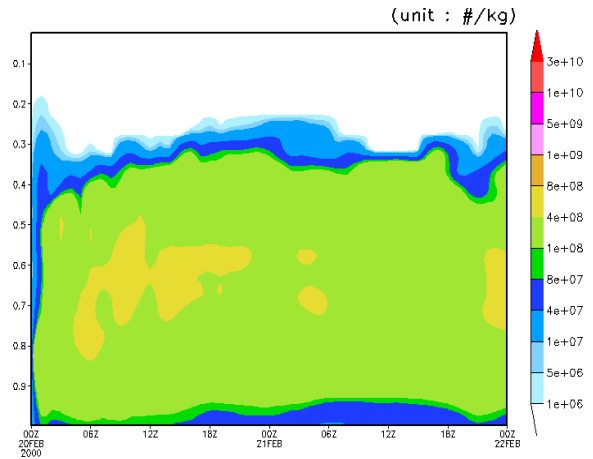
(d) CR



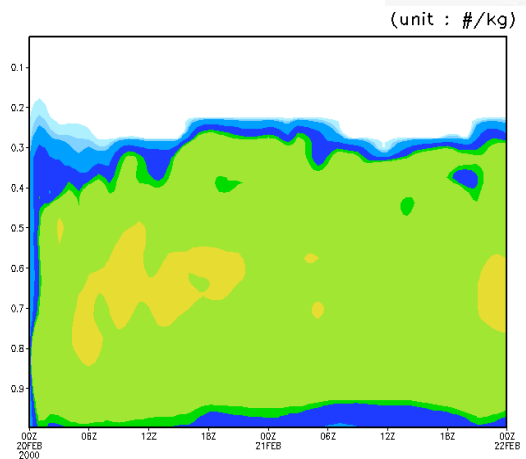
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

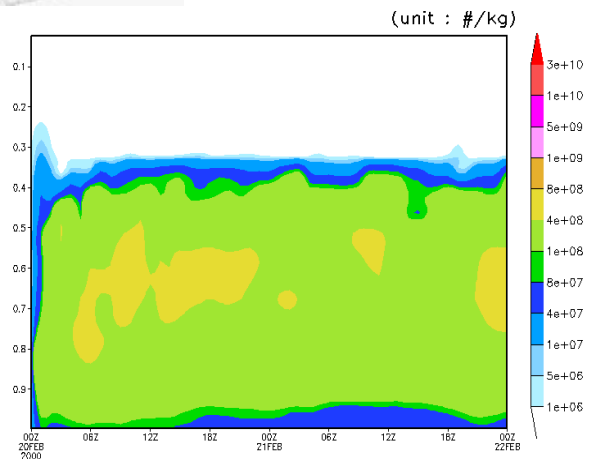
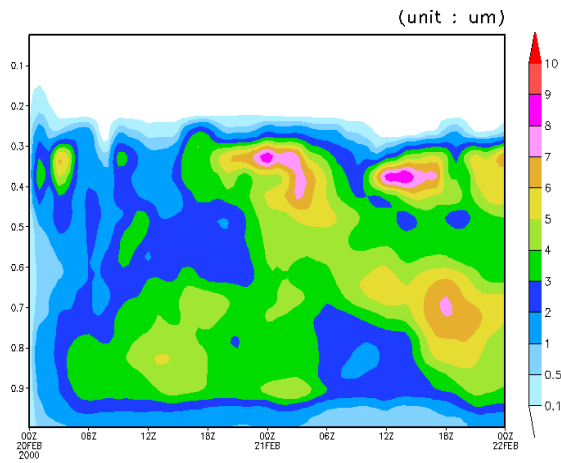
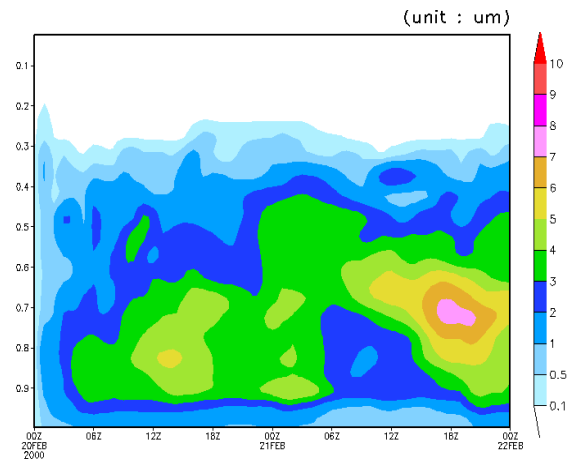


圖 4.22: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，雲滴數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a) IN = 0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

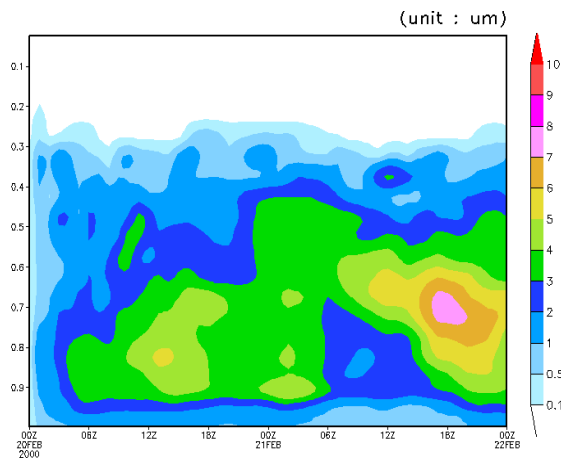
(a) IN = 0



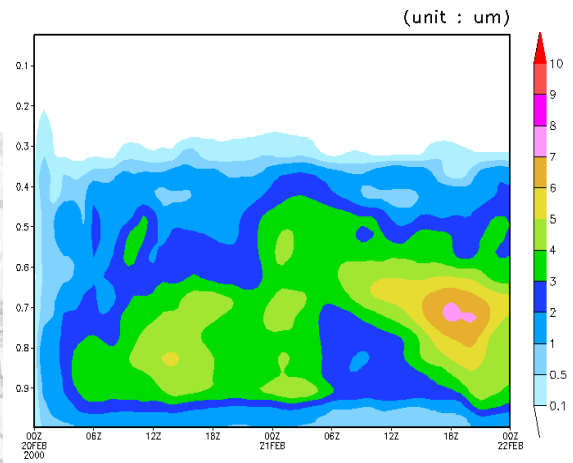
(d) CR



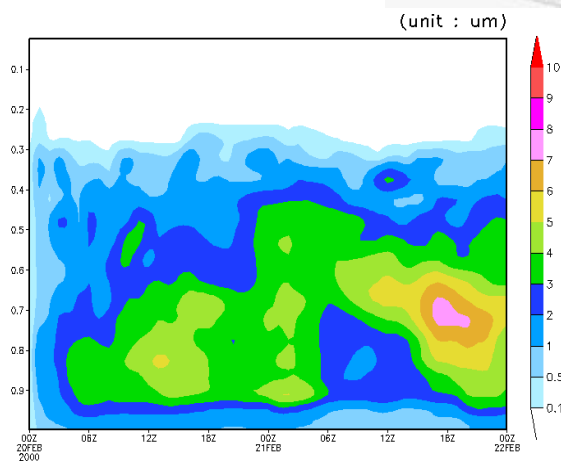
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

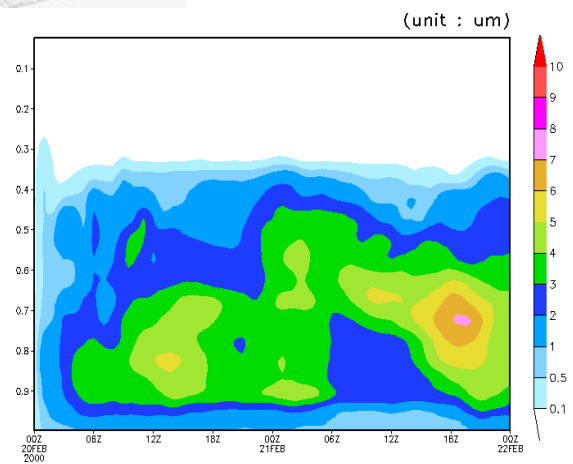
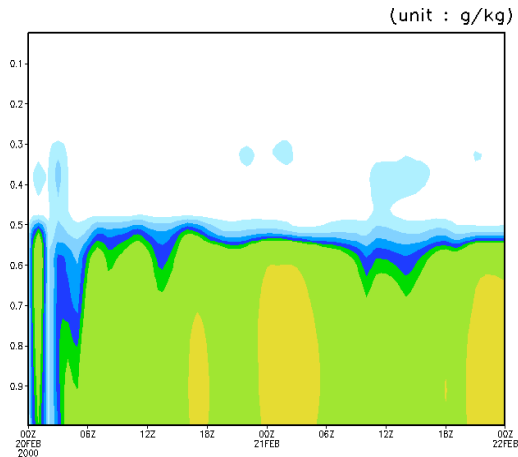
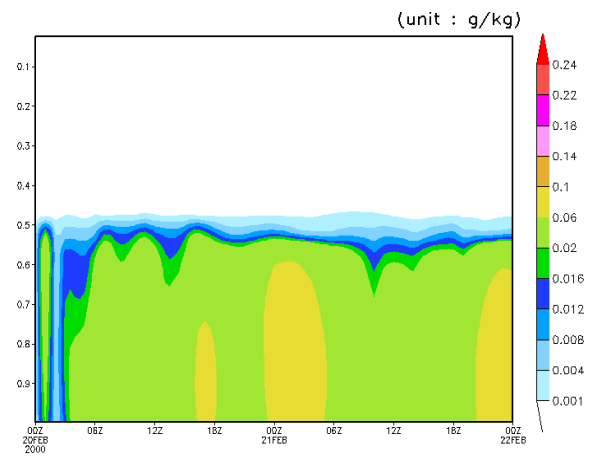


圖 4.23: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 雲滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) IN = 0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

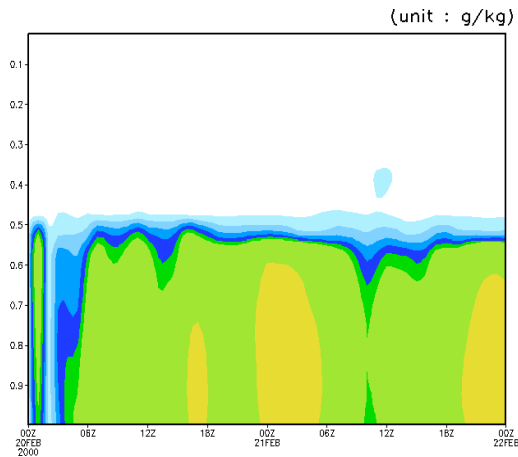
(a) $IN = 0$



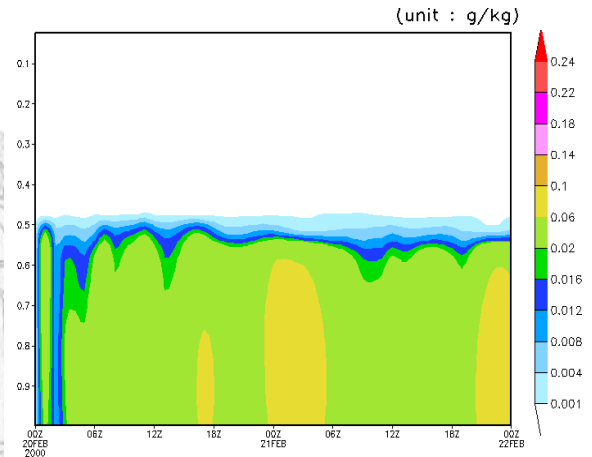
(d) CR



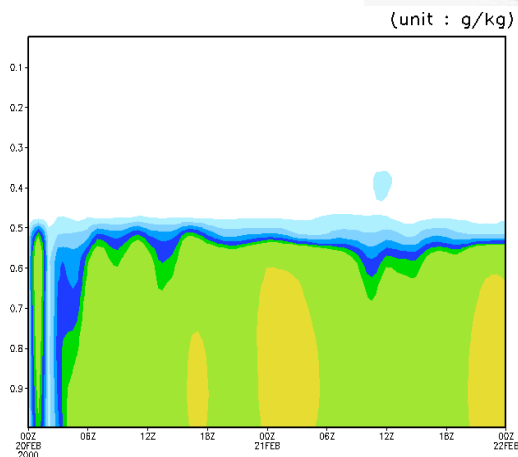
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

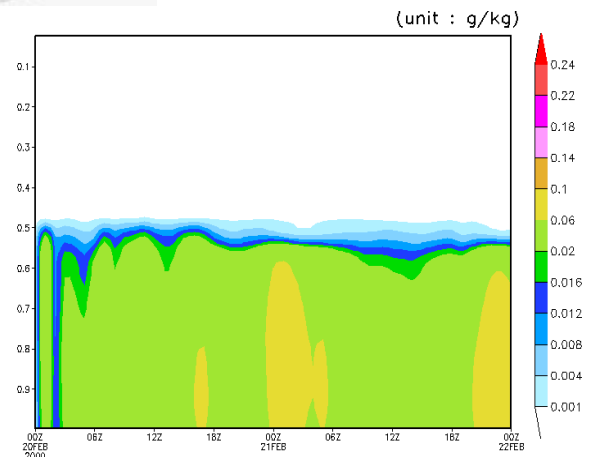
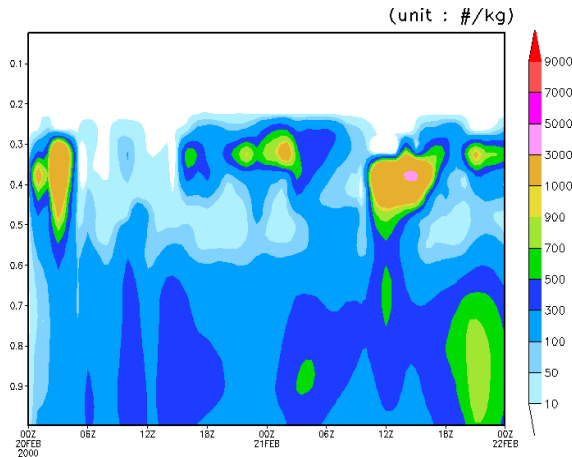
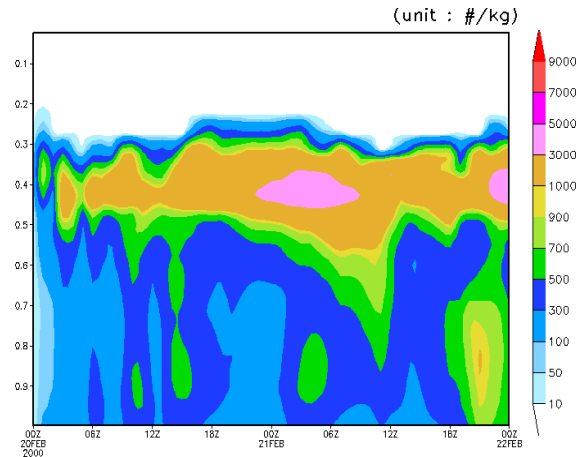


圖 4.24: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 雨水混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。 (a) $IN = 0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

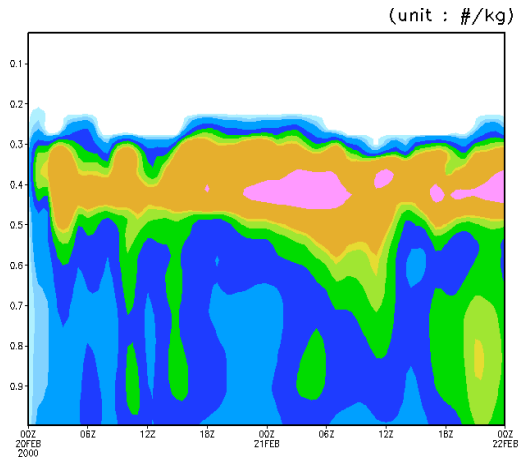
(a) $IN = 0$



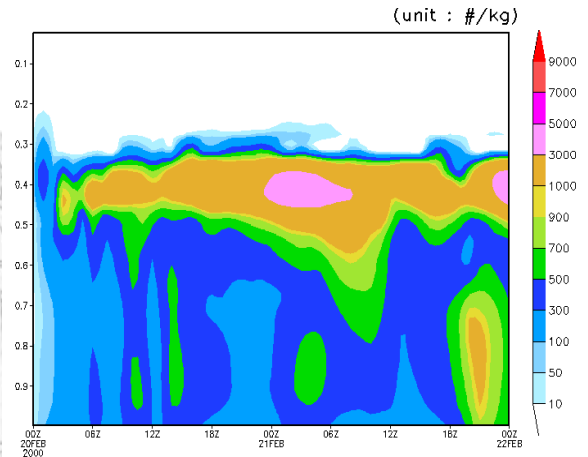
(d) CR



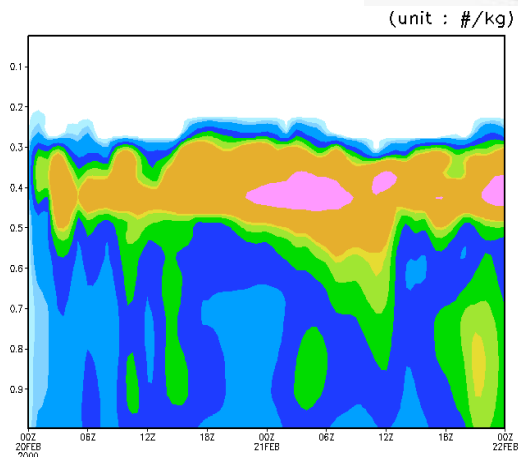
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

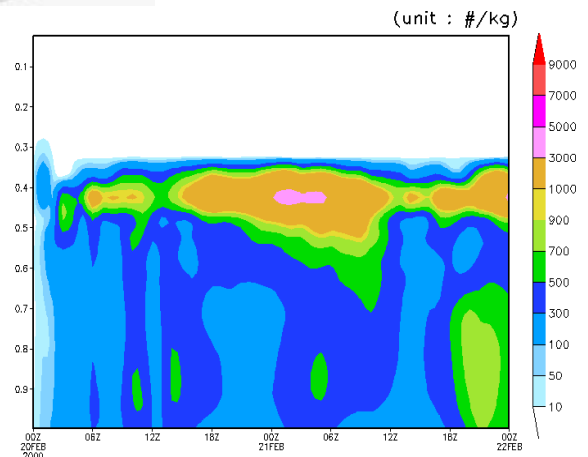
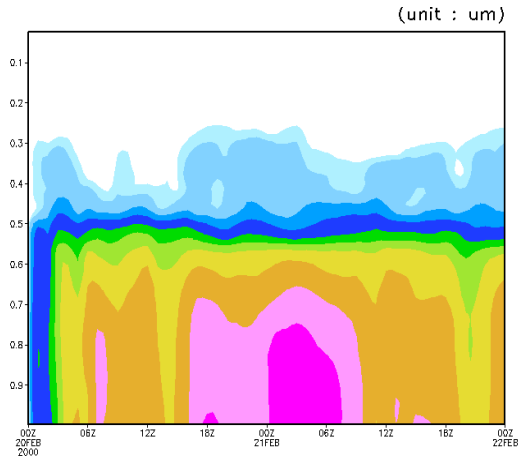
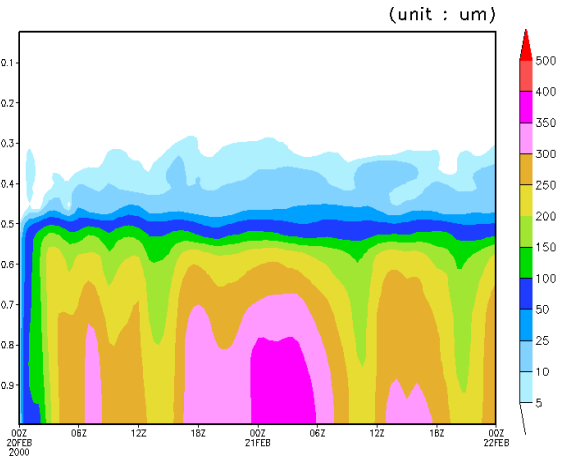


圖 4.25 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，雨滴數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a) $IN = 0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

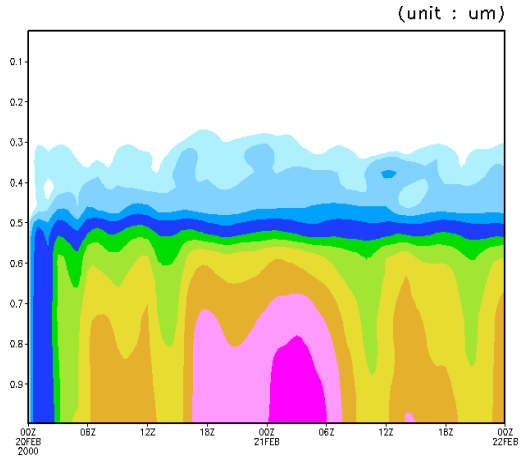
(a) IN = 0



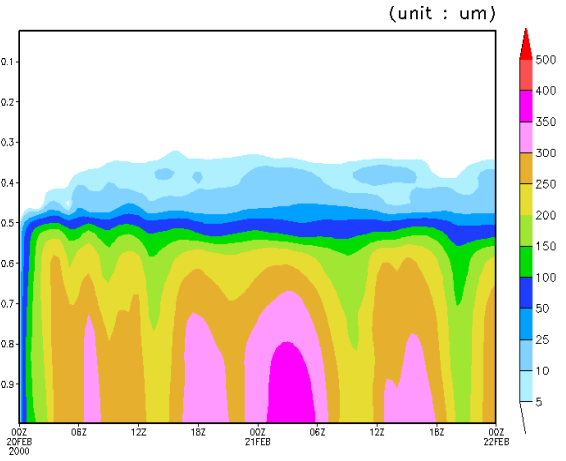
(d) CR



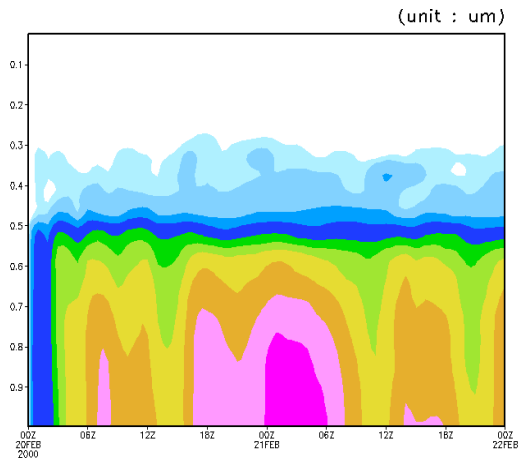
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

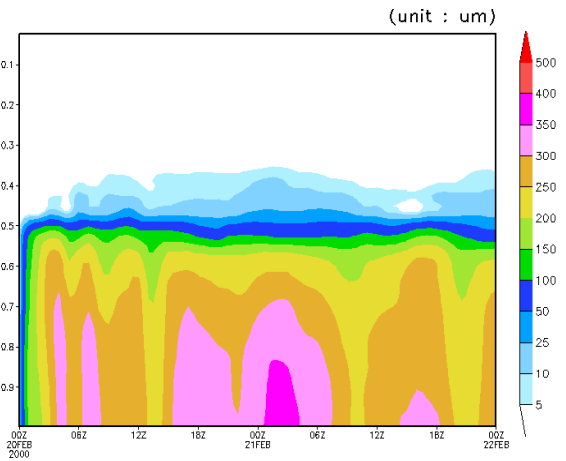
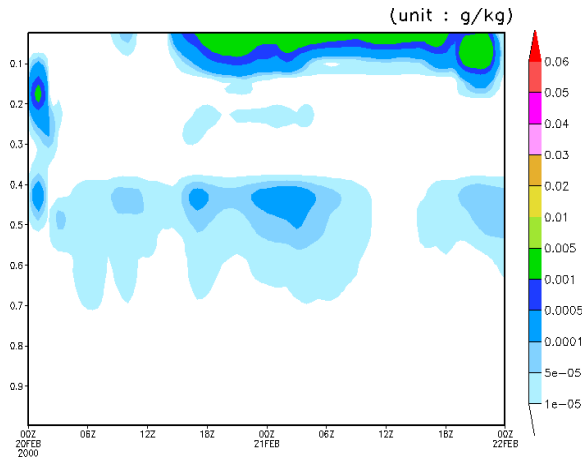
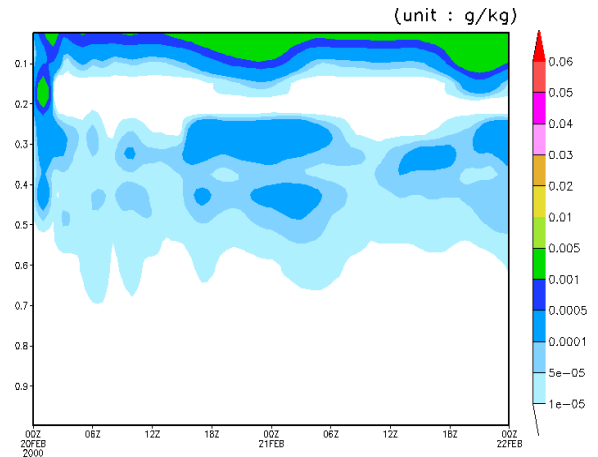


圖 4.26: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 雨滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) IN = 0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

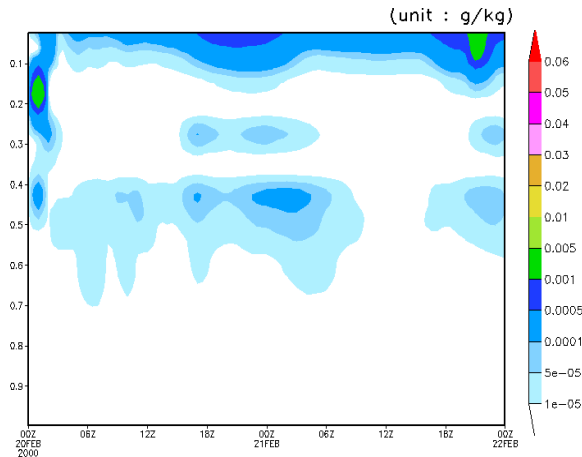
(a) $IN = 0$



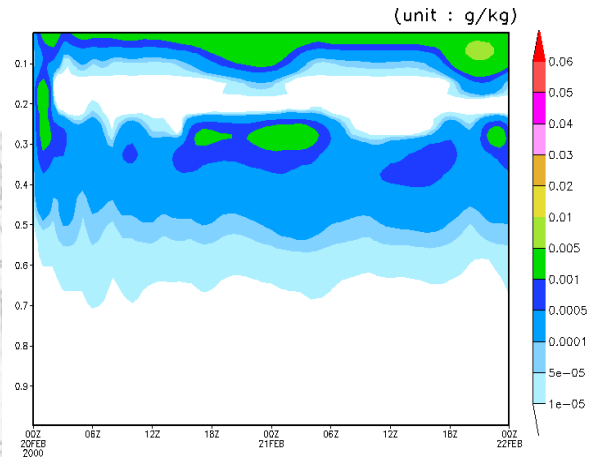
(d) CR



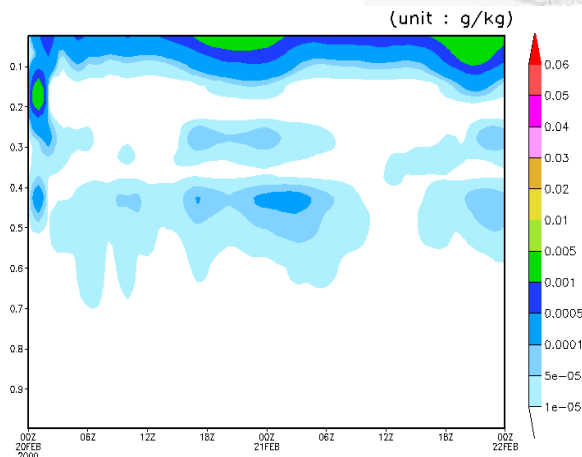
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

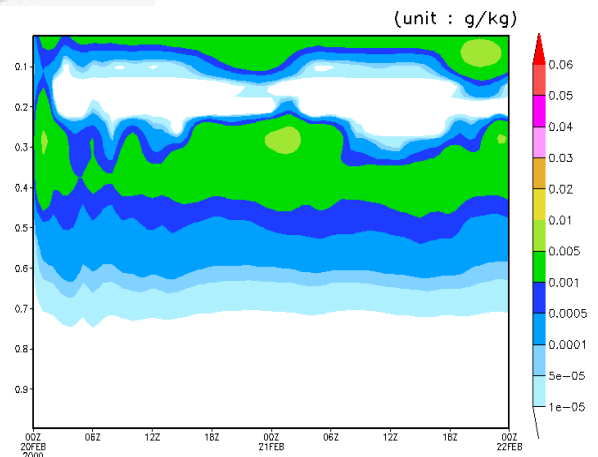
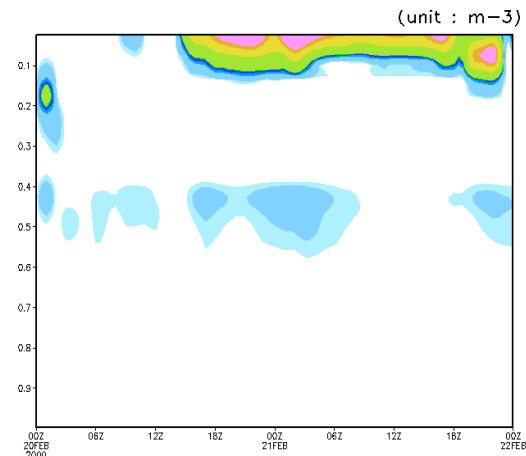
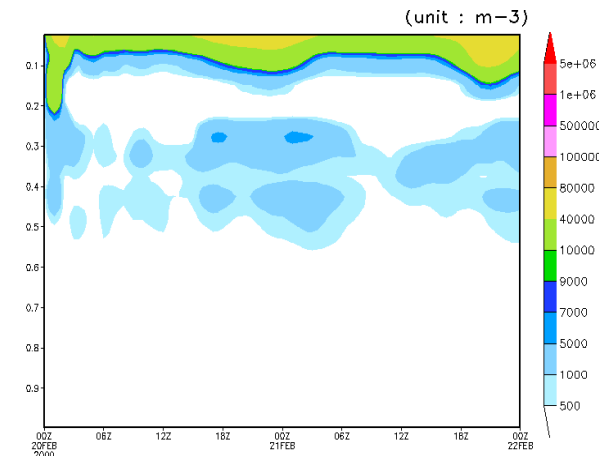


圖 4.27: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，雲冰混合比大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a) $IN=0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

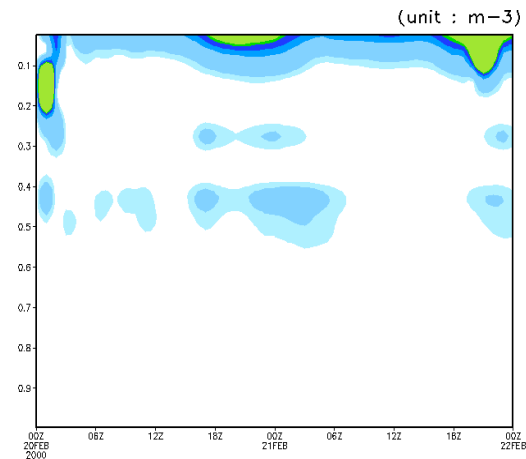
(a) $IN = 0$



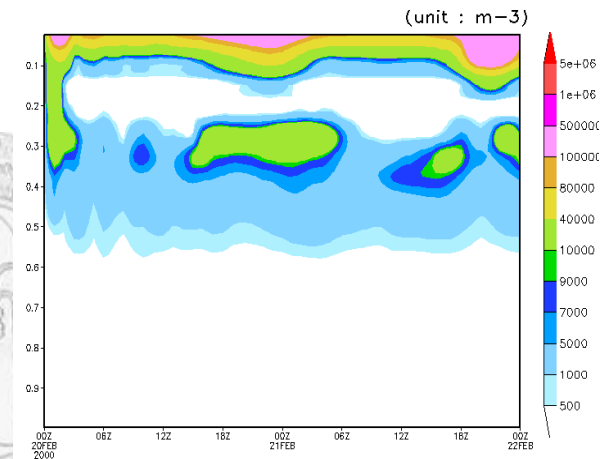
(d) CR



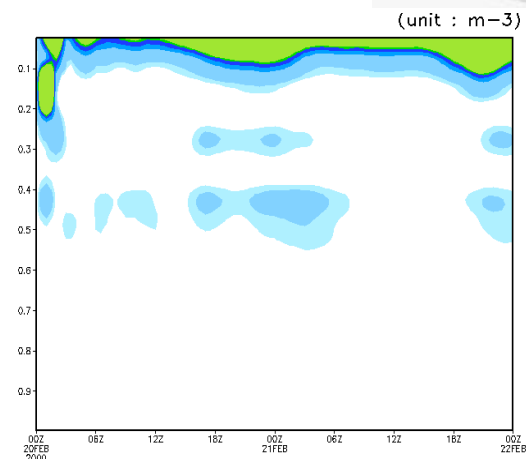
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

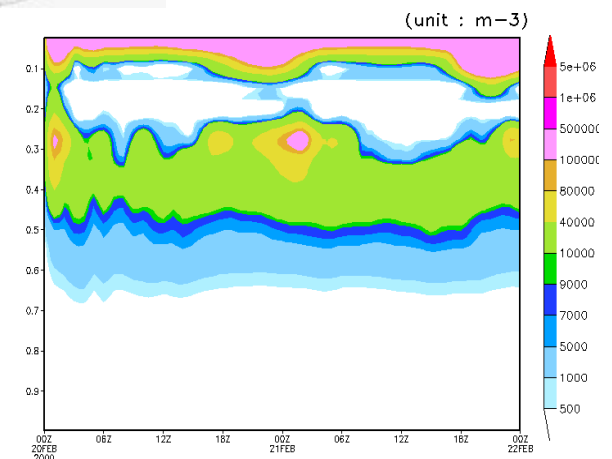


圖 4.28: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 冰晶的數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) $IN=0$; (b) $CCN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

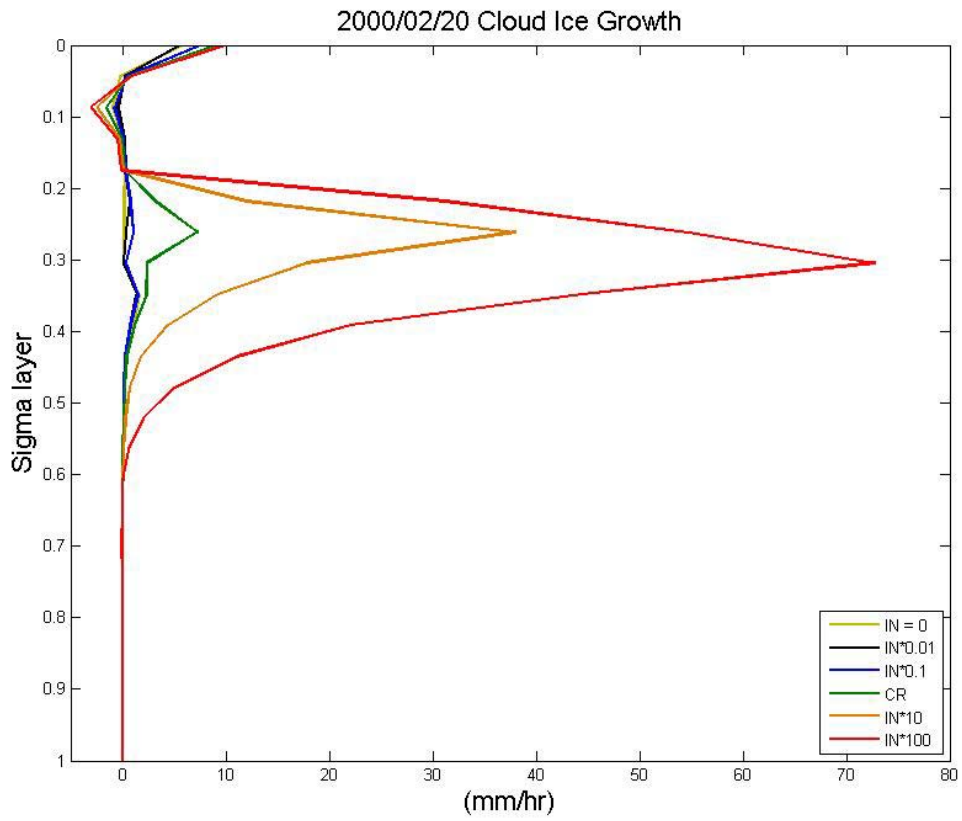
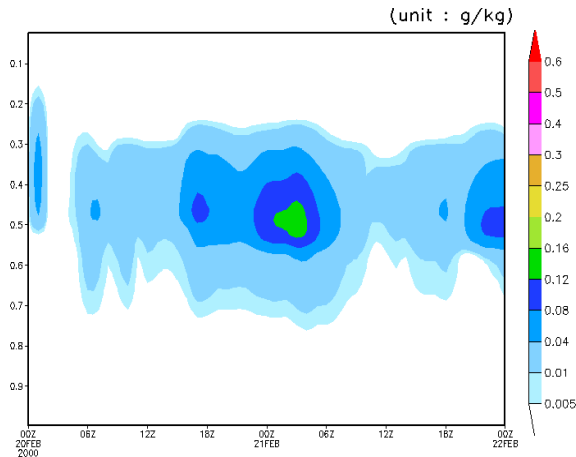
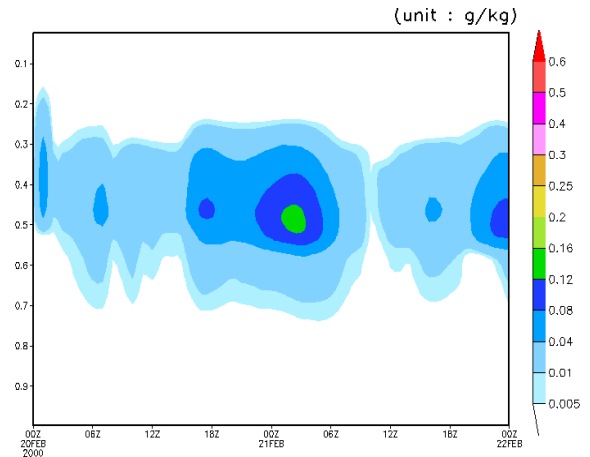


圖 4.29: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 CCN 濃度固定下，雲冰生長率垂直分布圖。

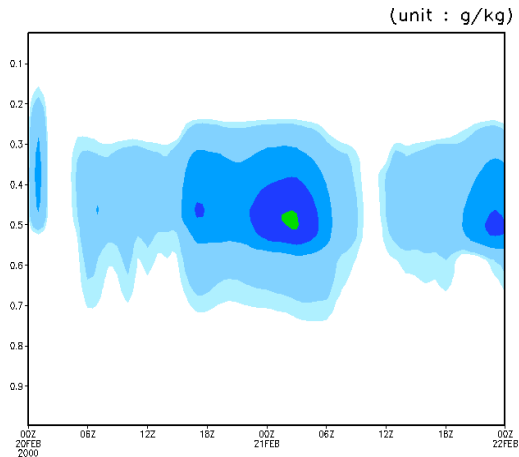
(a) IN = 0



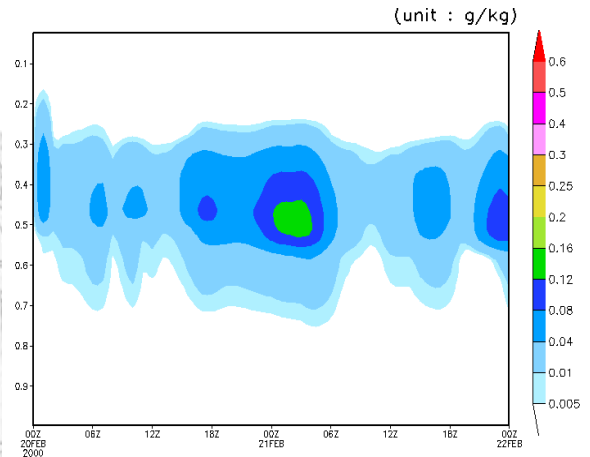
(d) CR



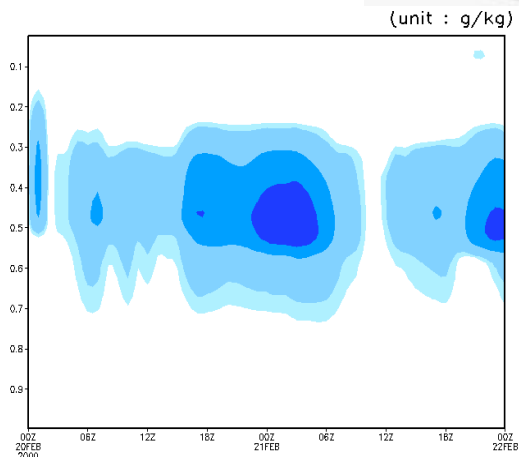
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

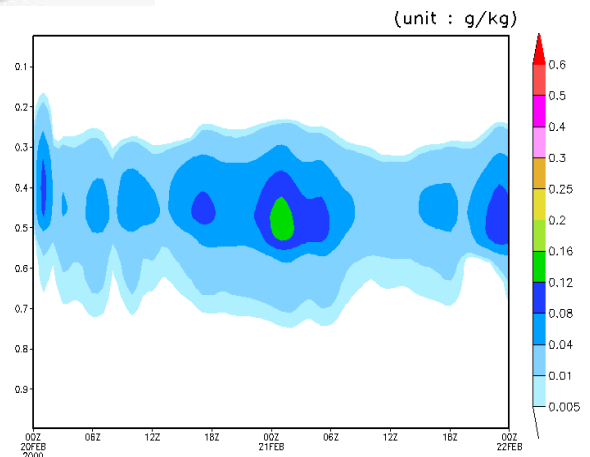
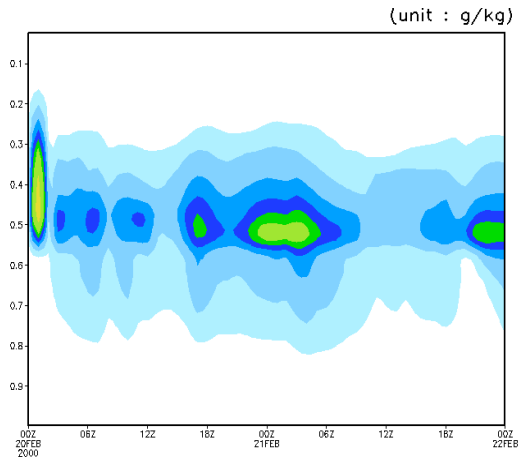
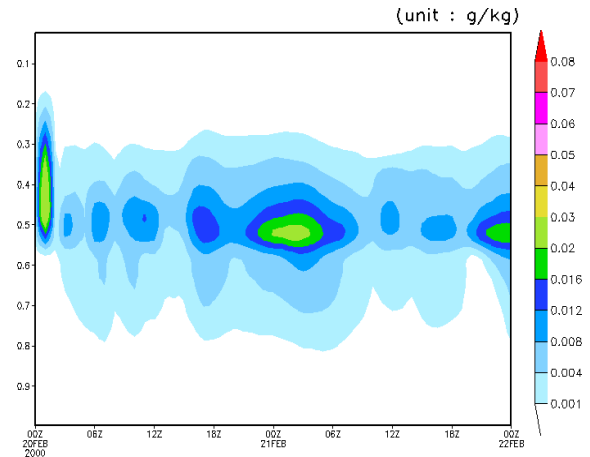


圖 4.30: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 雪混合比大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) IN = 0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

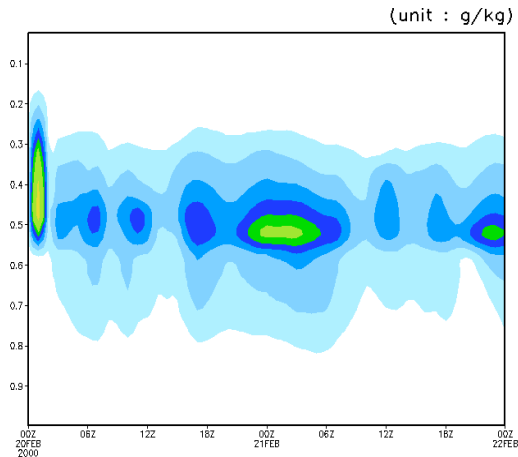
(a) $IN = 0$



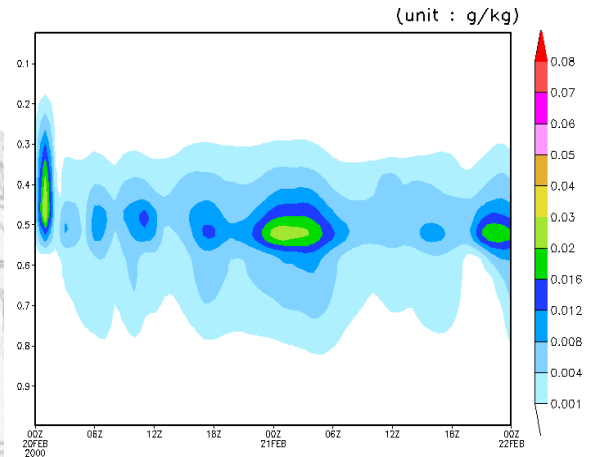
(d) CR



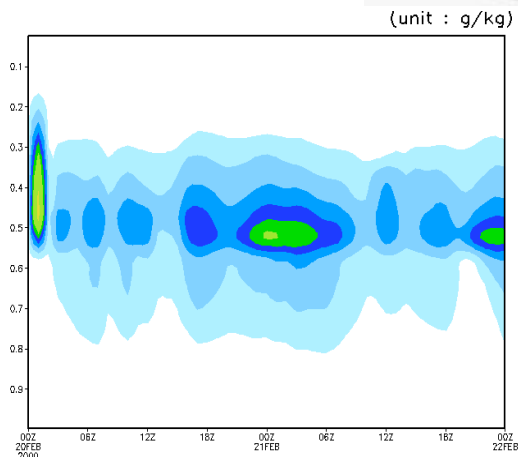
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

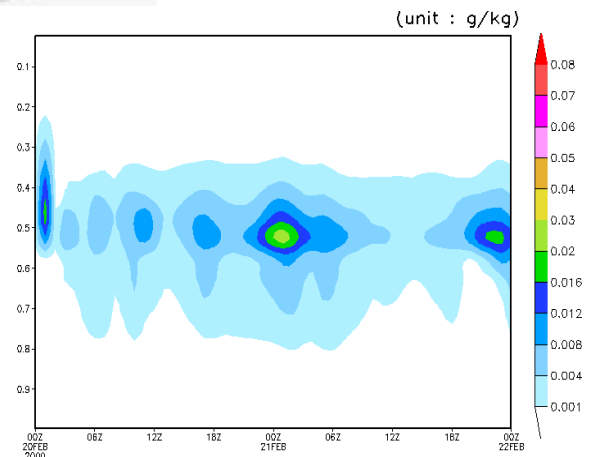


圖 4.31: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 電混比大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) $IN = 0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

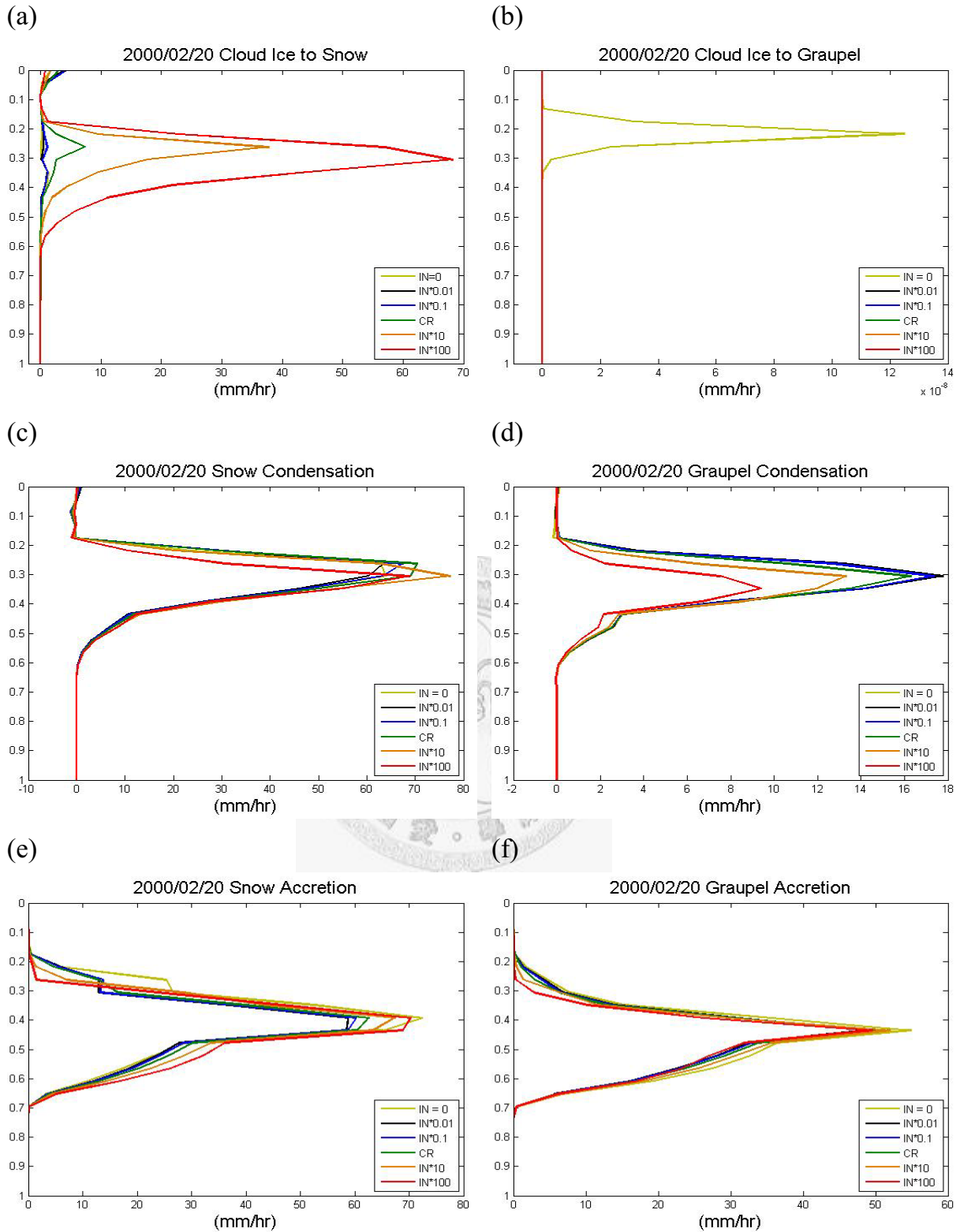
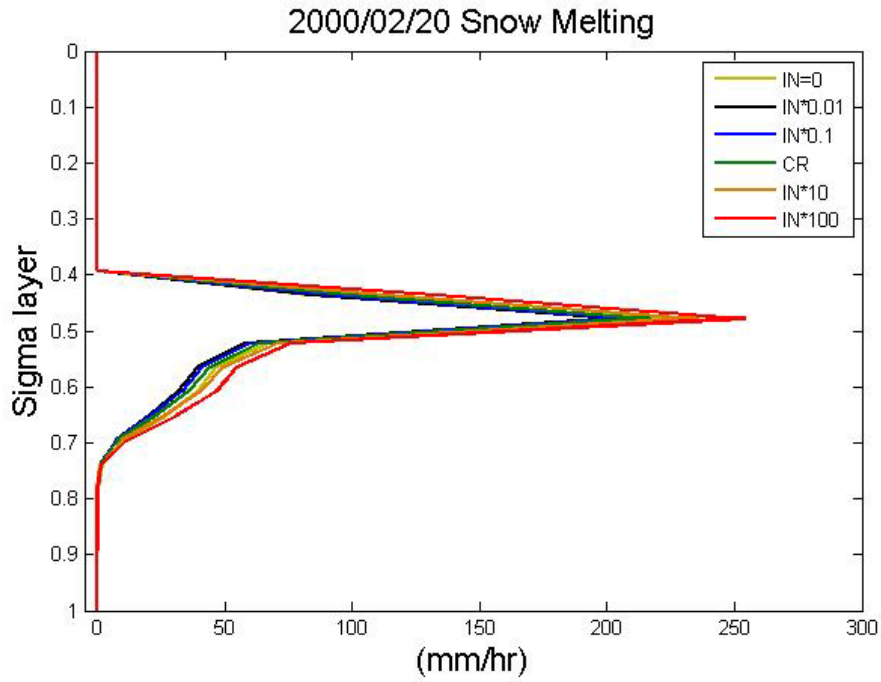
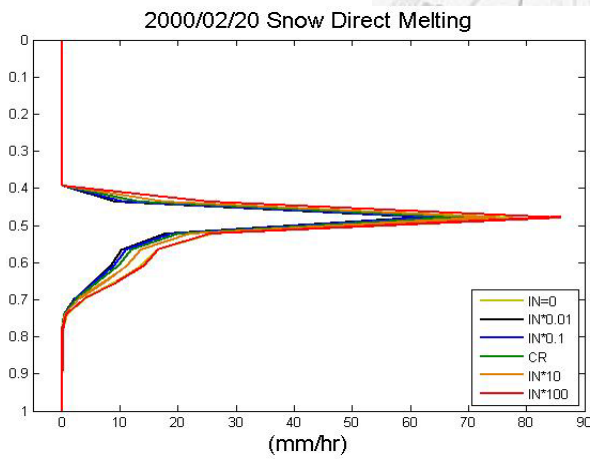


圖 4.32: 模擬 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 CCN 濃度固定下，(a)雲冰轉換成雪的生長率垂直分布圖;(b)雲冰轉換成電的生長率垂直分布圖;(c)雪凝結生長率; (d)電凝結生長率; (e)雪撞併過程生長率; (f)電撞併過程生長率。

(a)



(b)



(c)

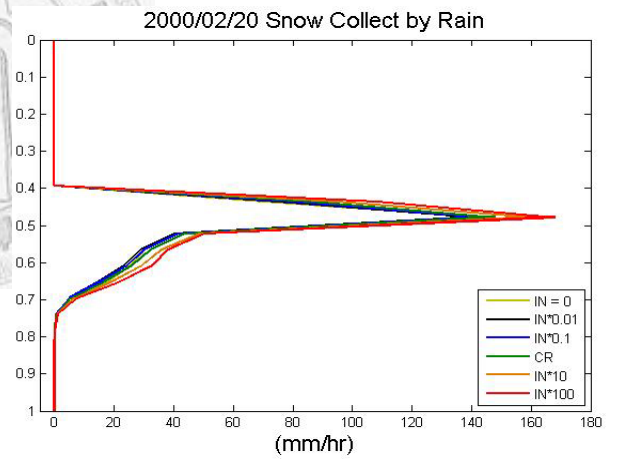
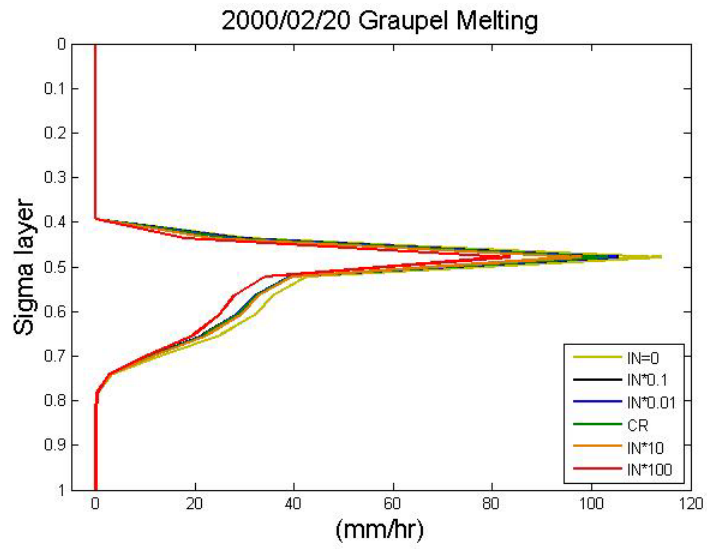
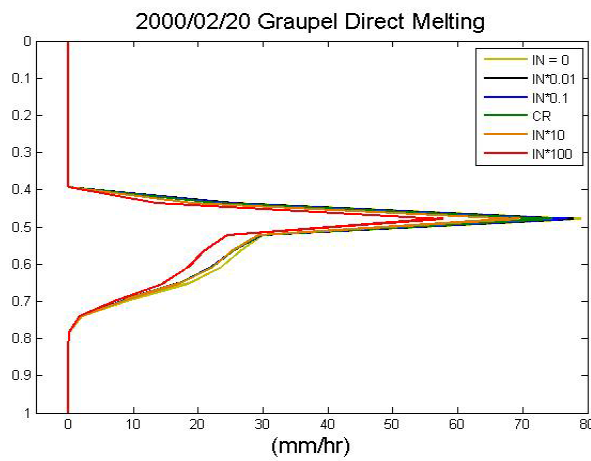


圖 4.33: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 CCN 濃度固定下，(a)雪的總融化率;(b)雪的直接融化率;(c)融化的雪被雨滴收集的效率。

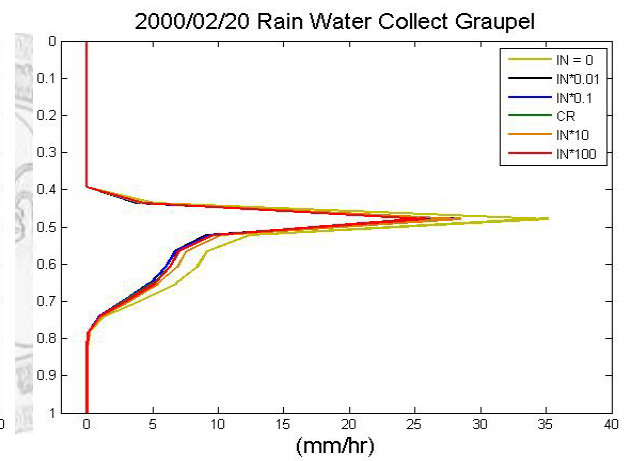
(a)



(b)



(c)



(d)

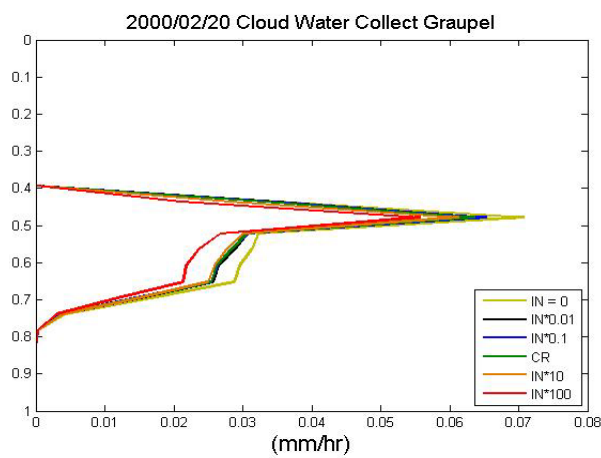


圖 4.34: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 CCN 濃度固定下，(a)電的總融化率;(b)電的直接融化率;(c)融化的電被雨滴收集的效率;(d)融化的電被雲滴收集的效率。

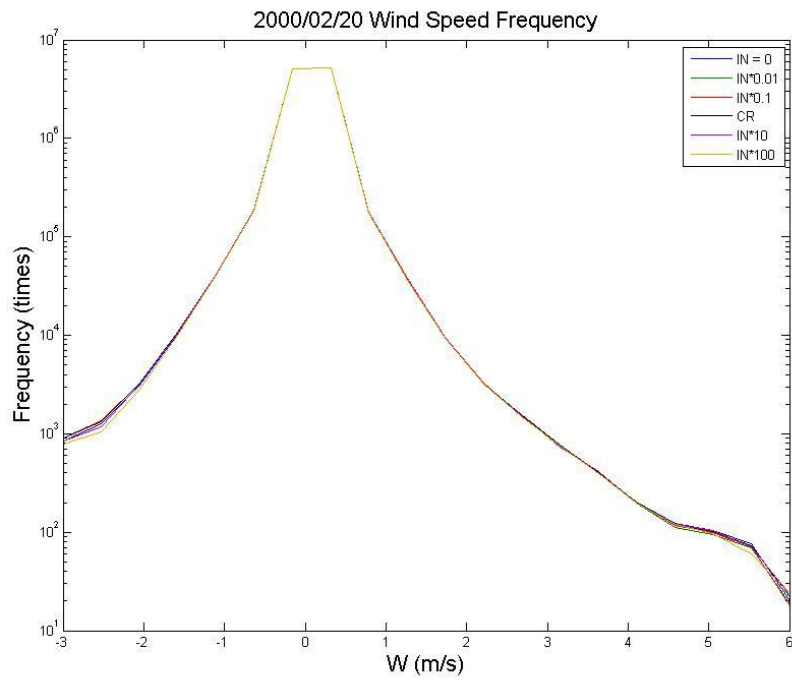


圖 4.35: 2000 年 2 月 20 日 00UTC 到 22 日 00UTC，更改 IN 數量濃度所模擬出在 48 小時內，-3 m/s ~ 6 m/s 每 0.5m/s 為一個區間，計算所有區間內風速出現的次數。

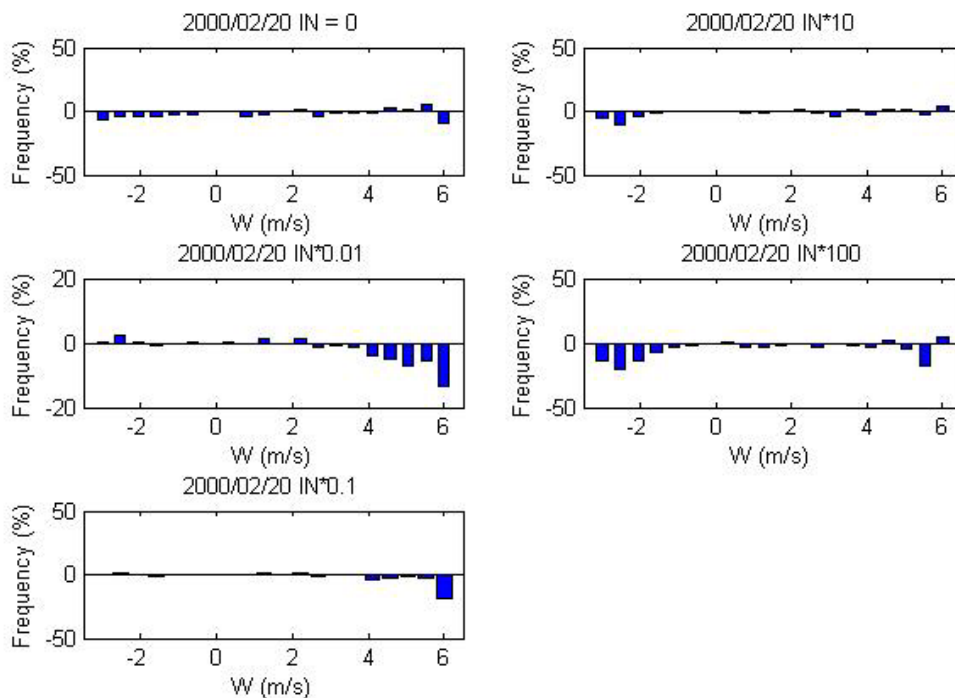


圖 4.36: 承圖 4.33，以 CR 為基準值所做出之距平圖。

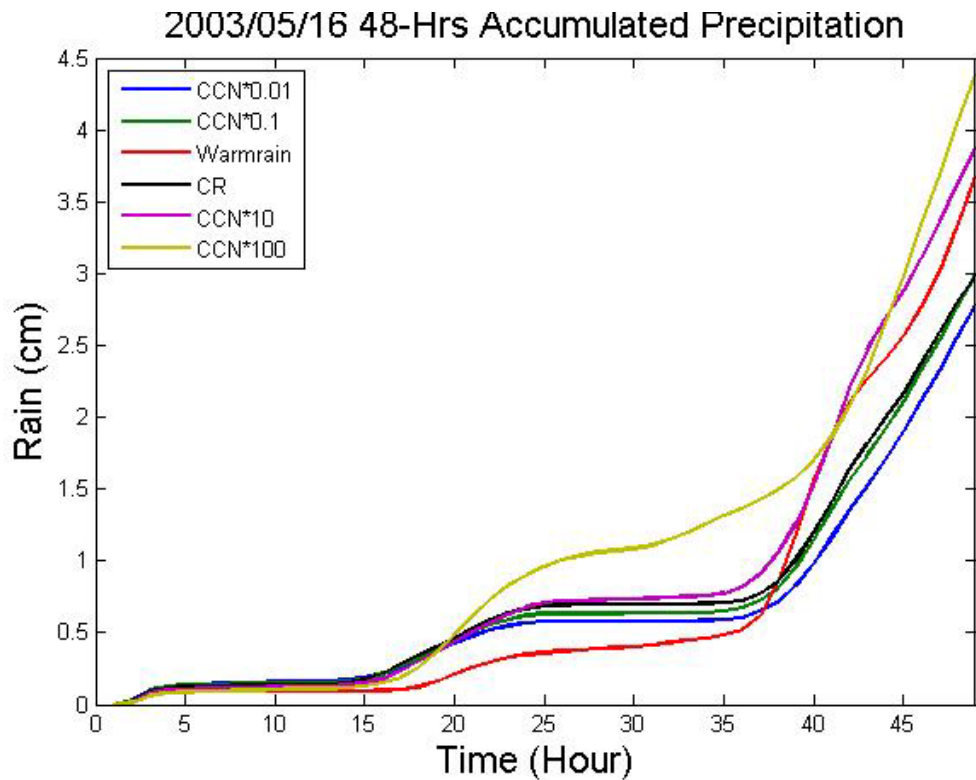


圖 4.37: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 更改 CCN 數量濃度所模擬出之 48 小時累積降雨量圖。

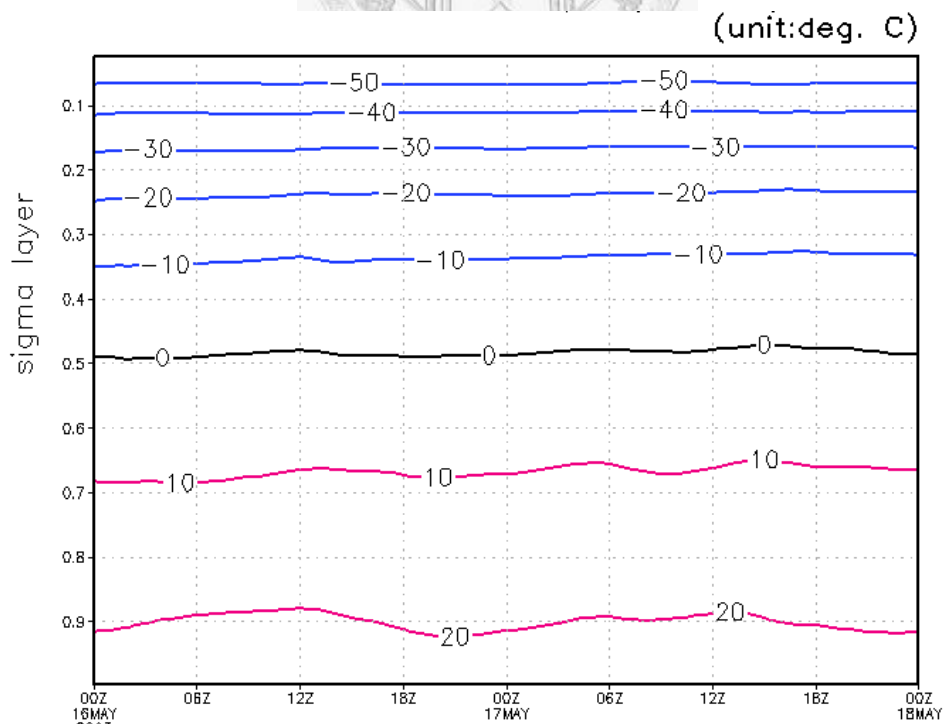
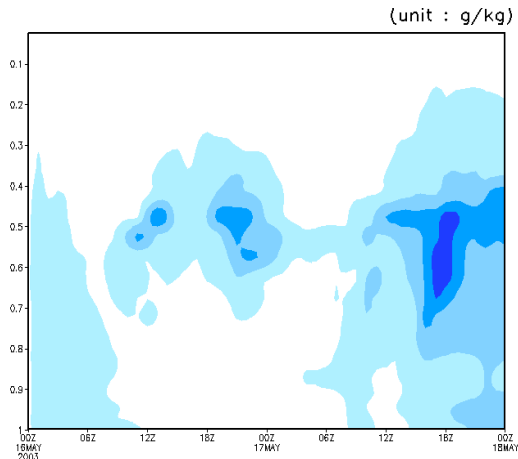
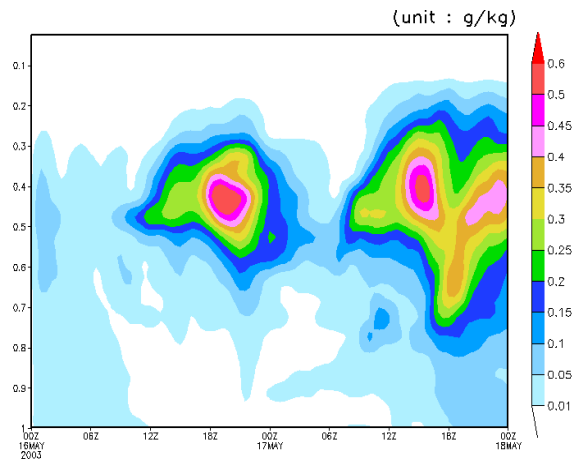


圖 4.38: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC 平均溫度模擬結果。

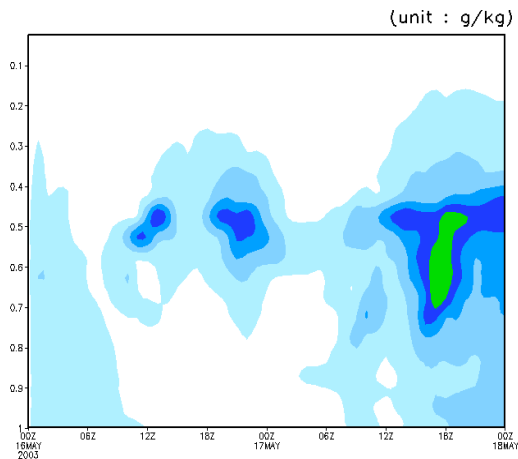
(a) CCN*0.01



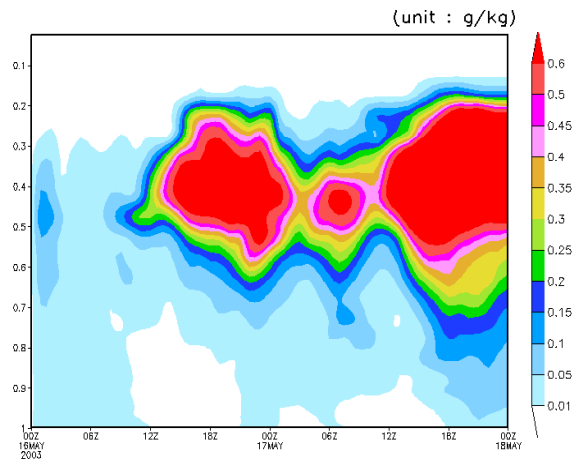
(d) CCN*10



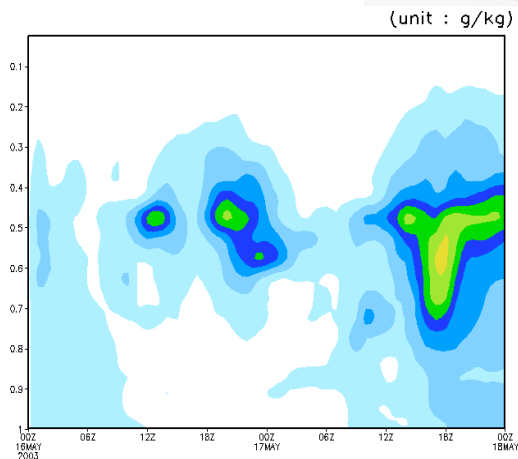
(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR



(f)

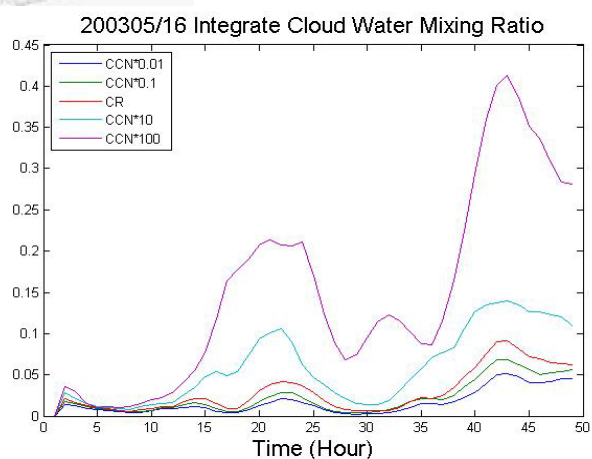
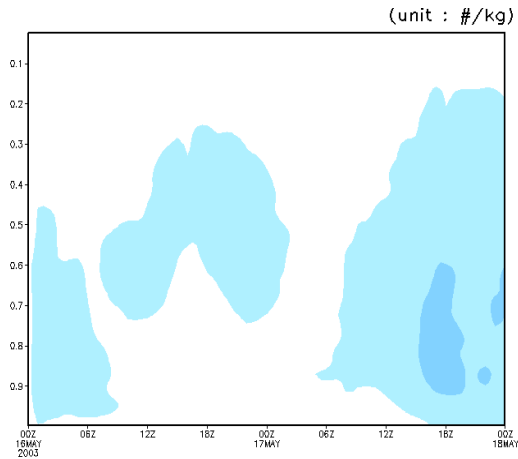
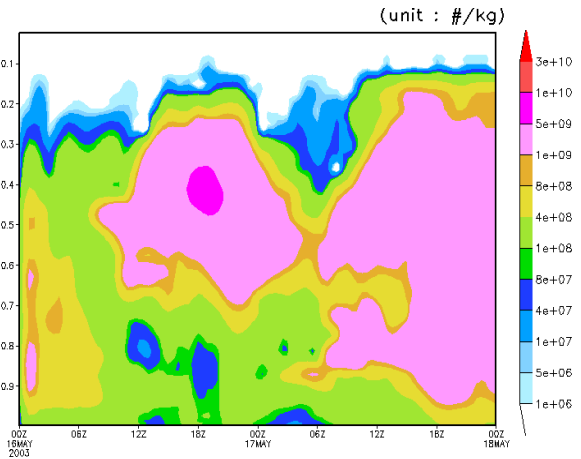


圖 4.39: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雲水混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100; (f) 整層雲水厚度。

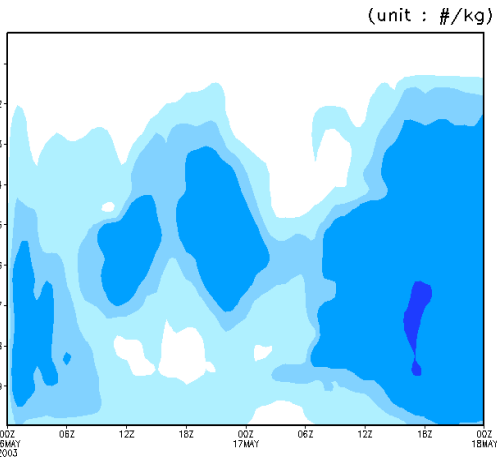
(a) CCN*0.01



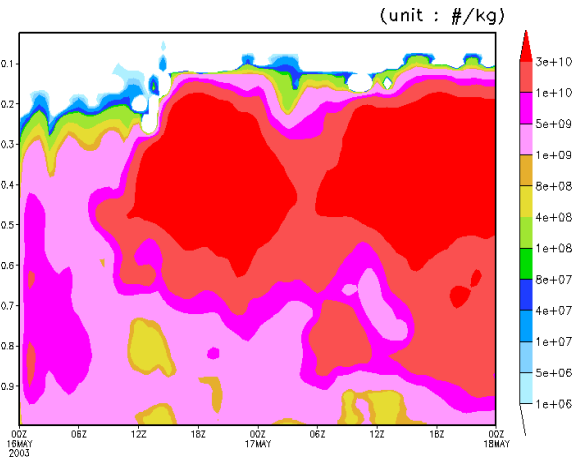
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

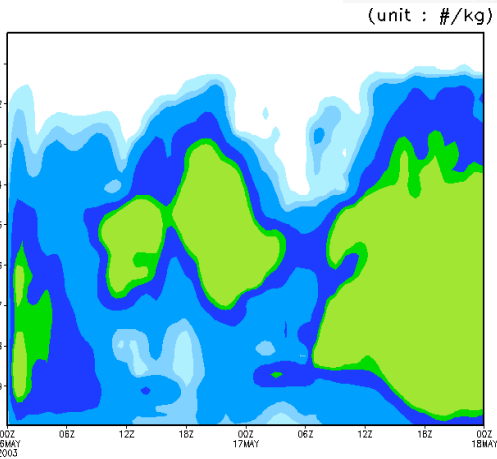
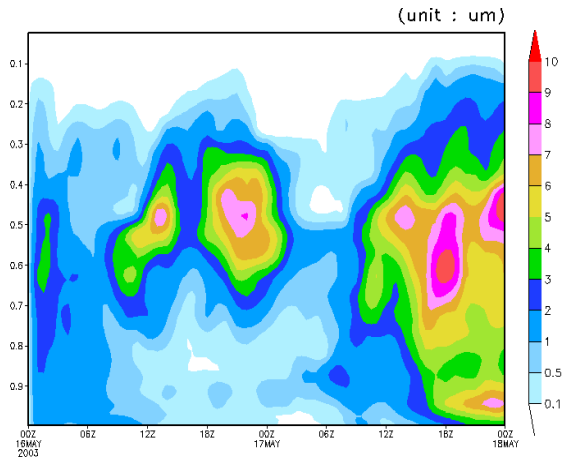
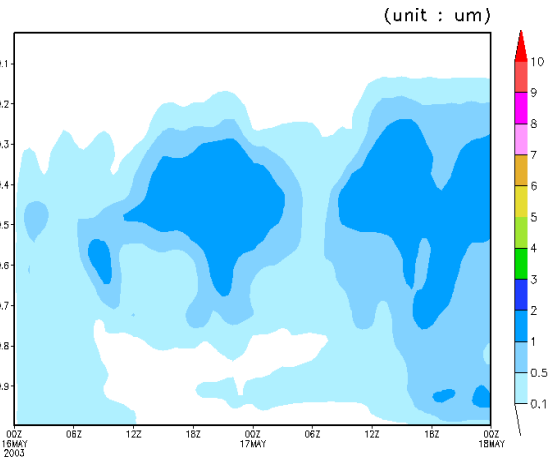


圖 4.40: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雲滴數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

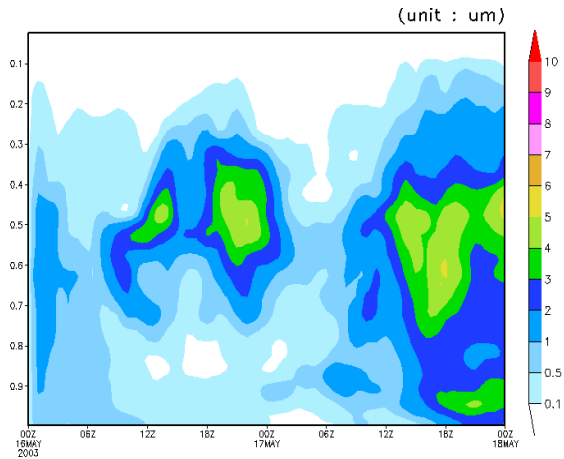
(a) CCN*0.01



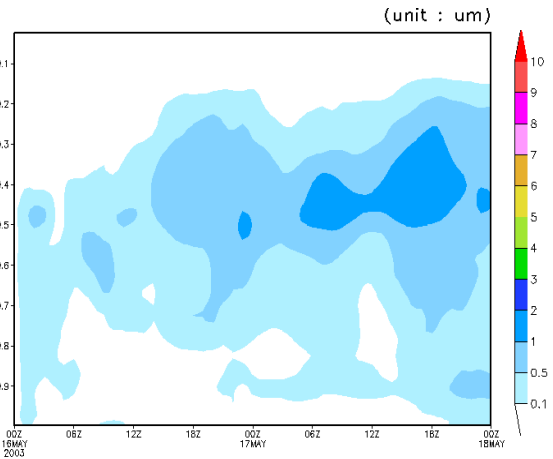
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

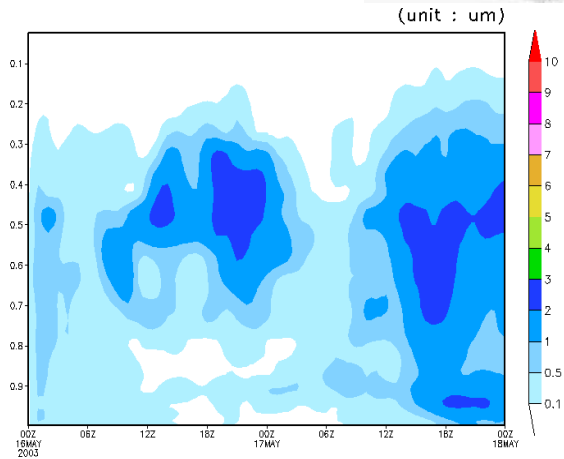
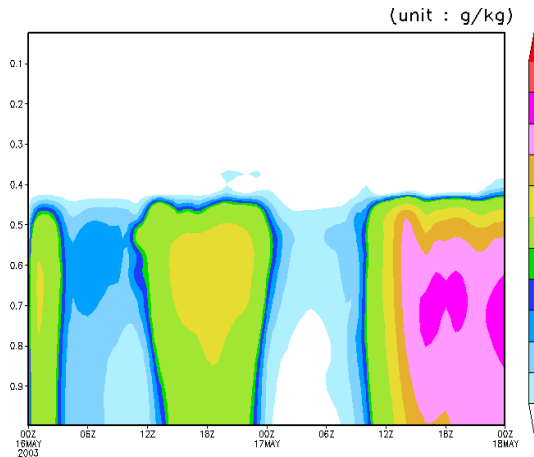
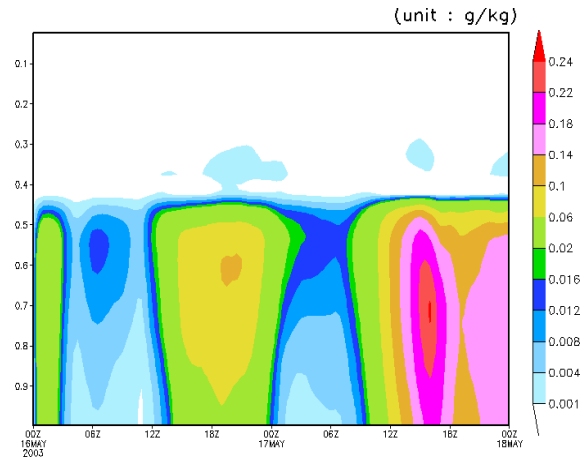


圖 4.41: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雲滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

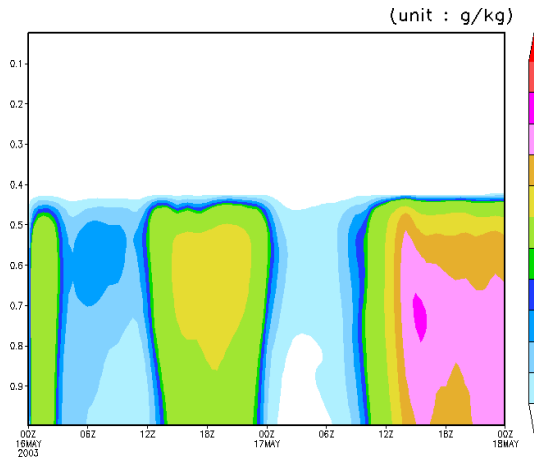
(a) CCN*0.01



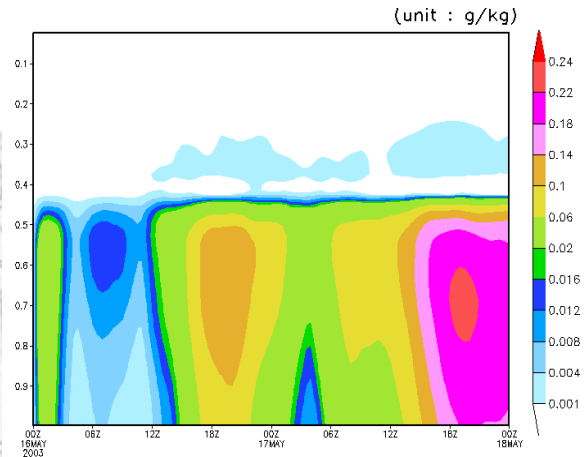
(d) CCN*10



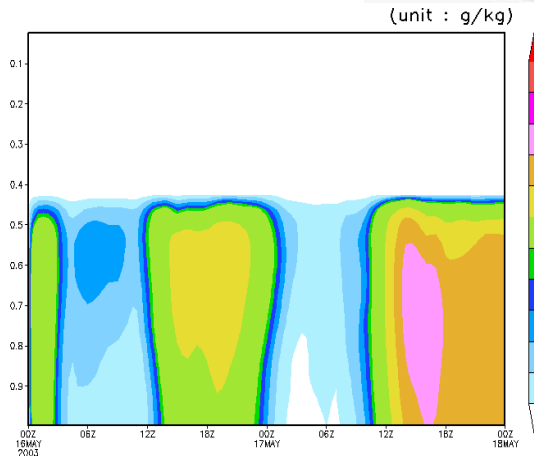
(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR



(f)

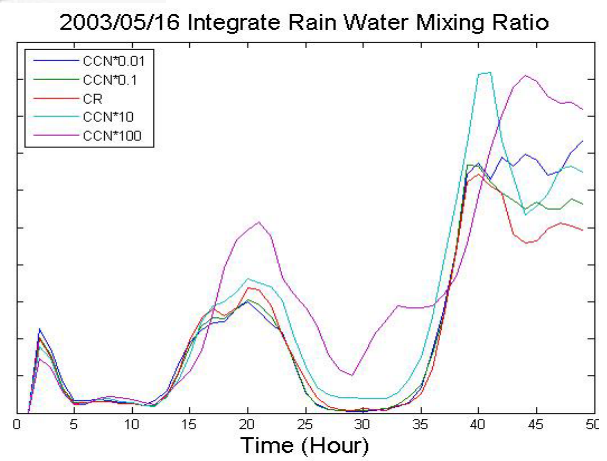
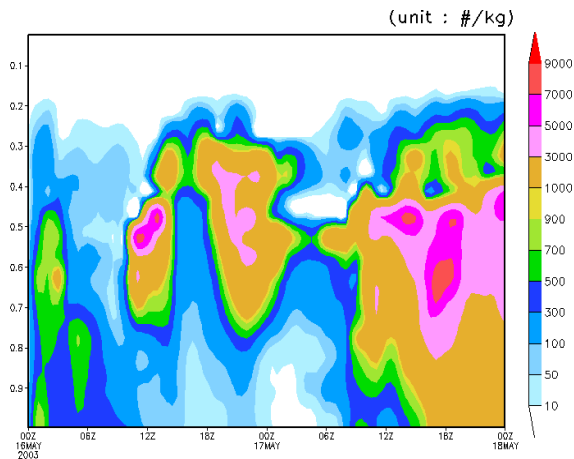
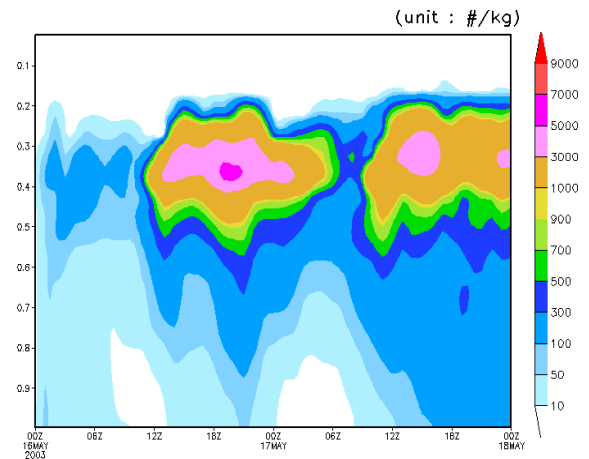


圖 4.42: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雨水混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100; (f) 整層雨水厚度。

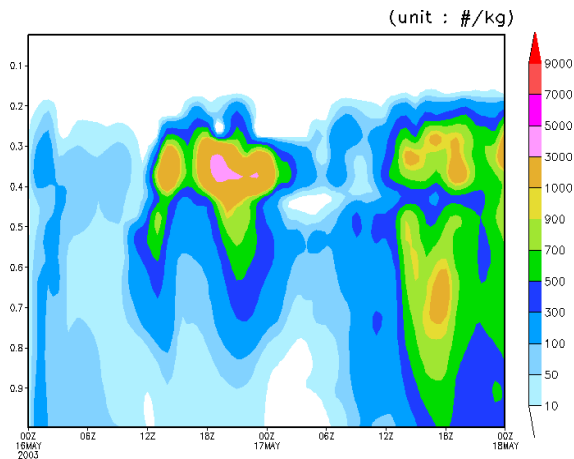
(a) CCN*0.01



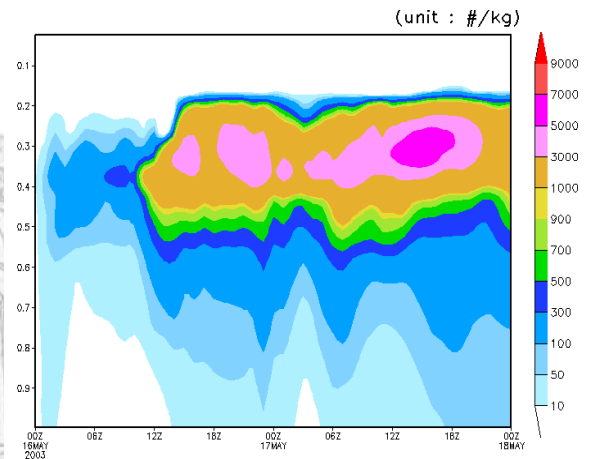
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

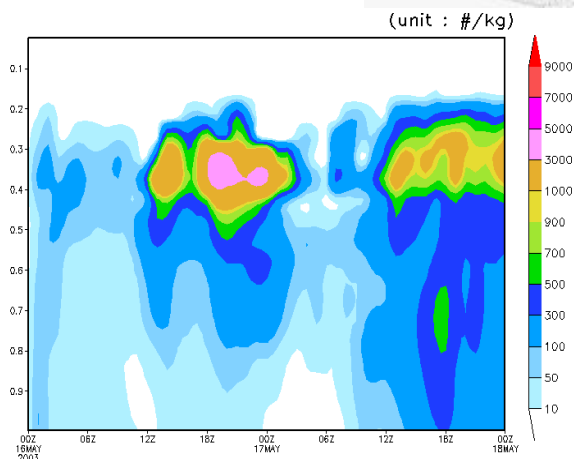
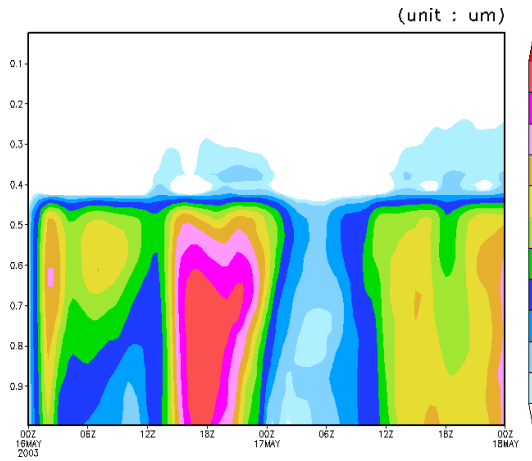
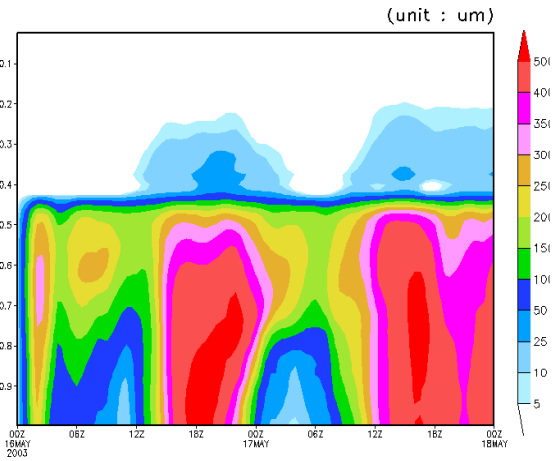


圖 4.43: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雨滴數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

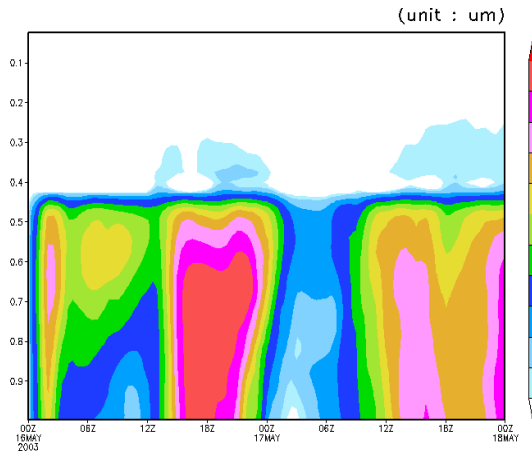
(a) CCN*0.01



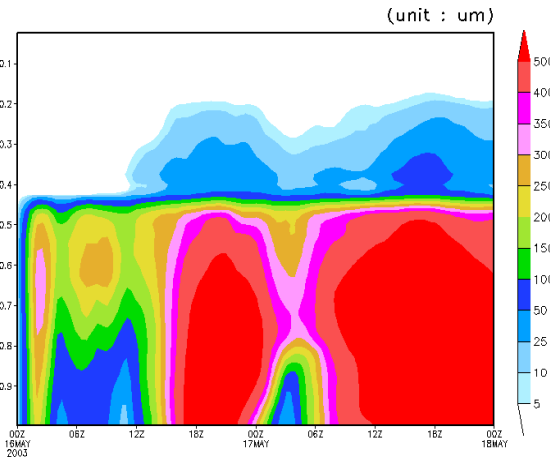
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

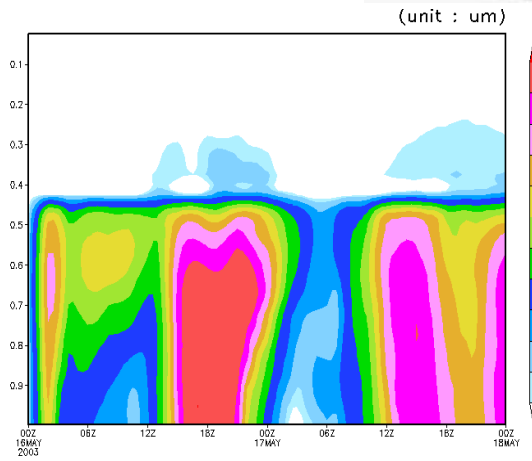
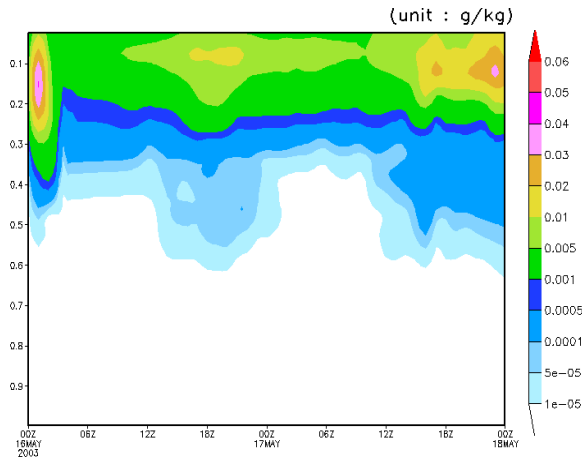
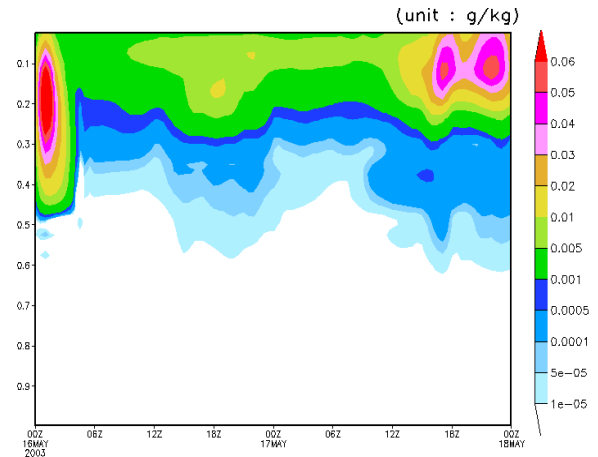


圖 4.44: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雨滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

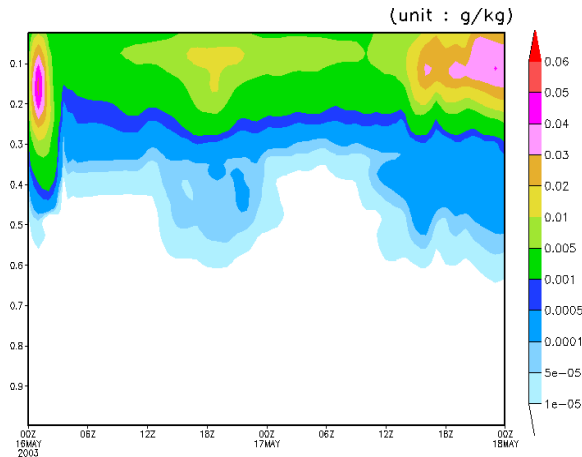
(a) CCN*0.01



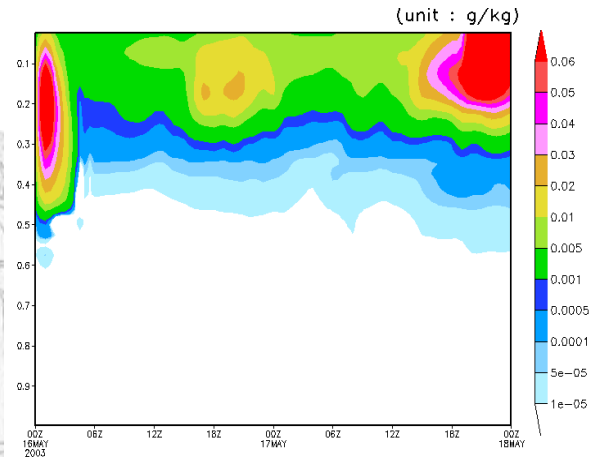
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

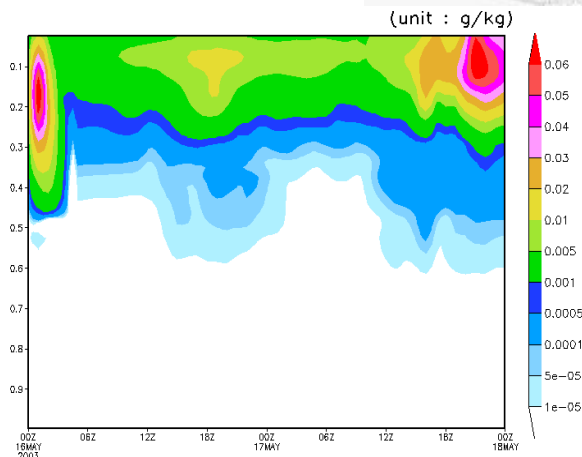
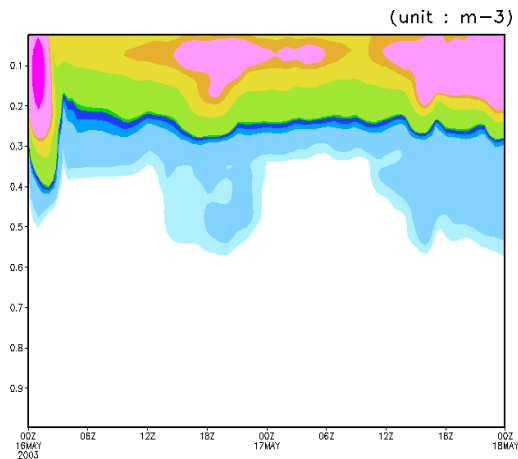
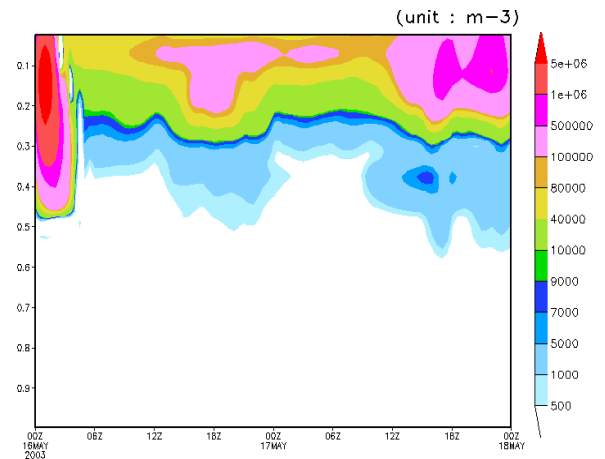


圖 4.45: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雲冰混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

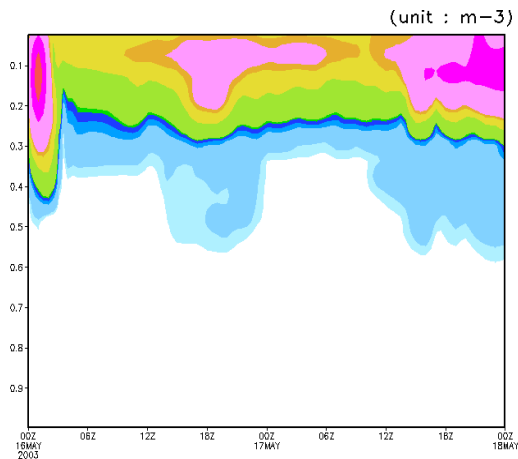
(a) CCN*0.01



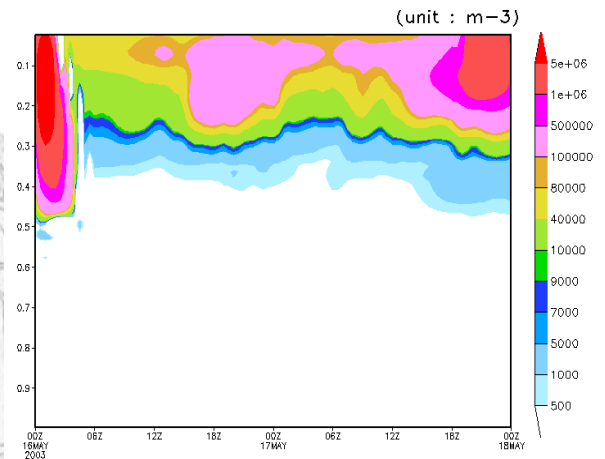
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

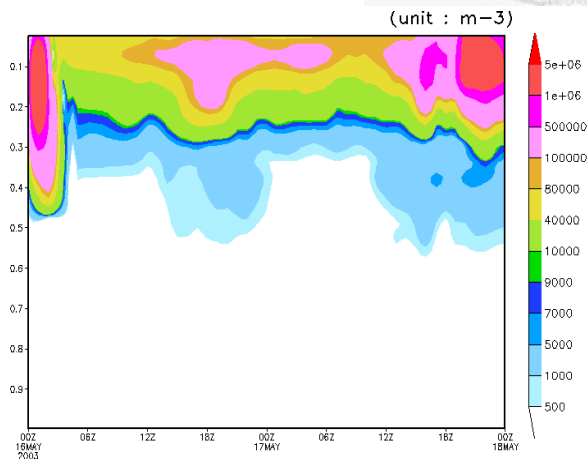


圖 4.46: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 冰晶數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

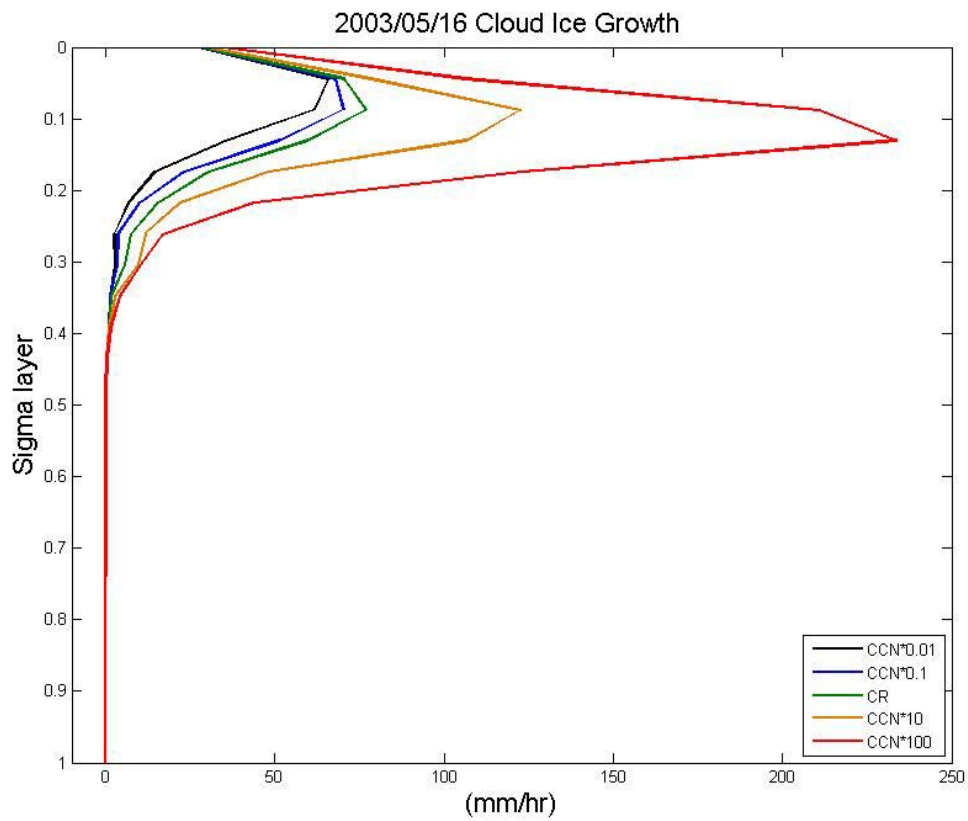
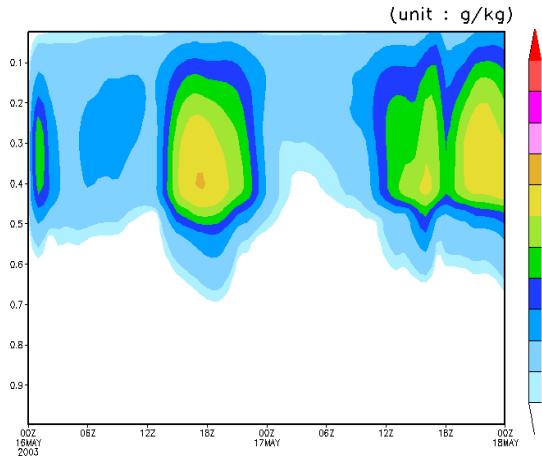
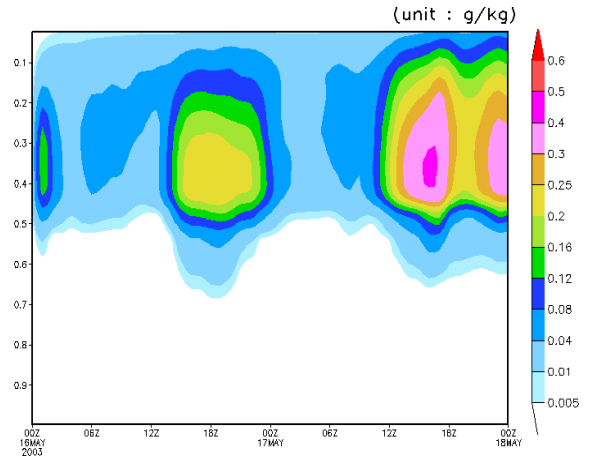


圖 4.47: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 IN 濃度固定下，雲冰生長率垂直分布圖。

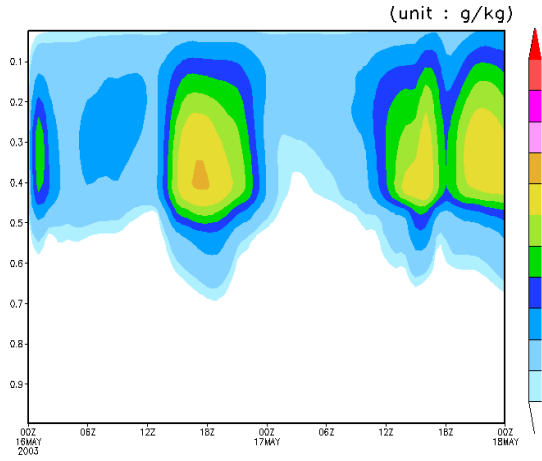
(a) CCN*0.01



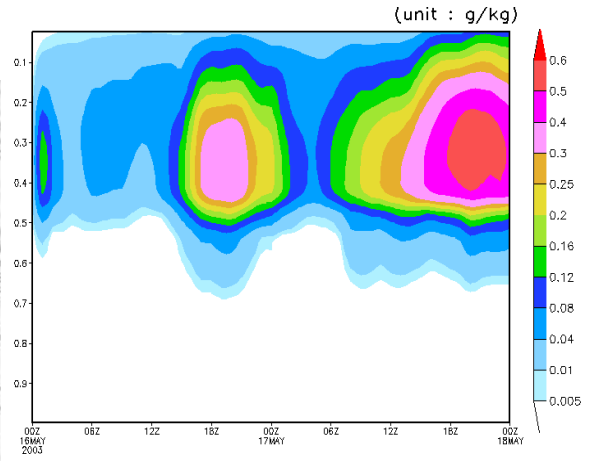
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

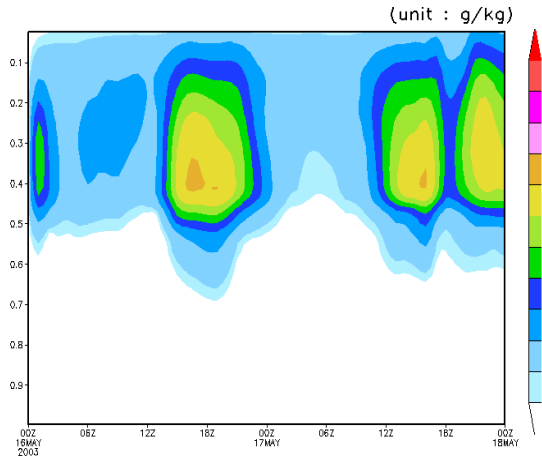
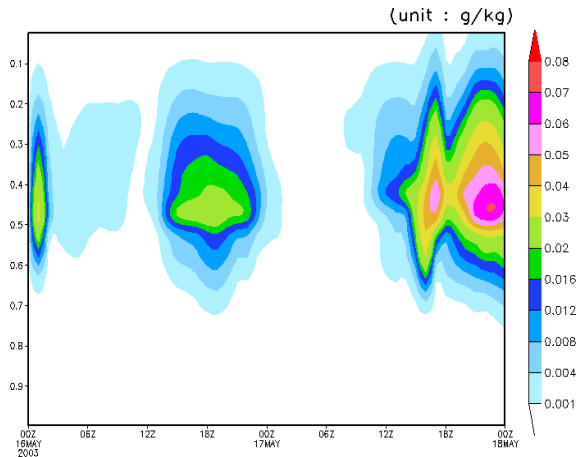
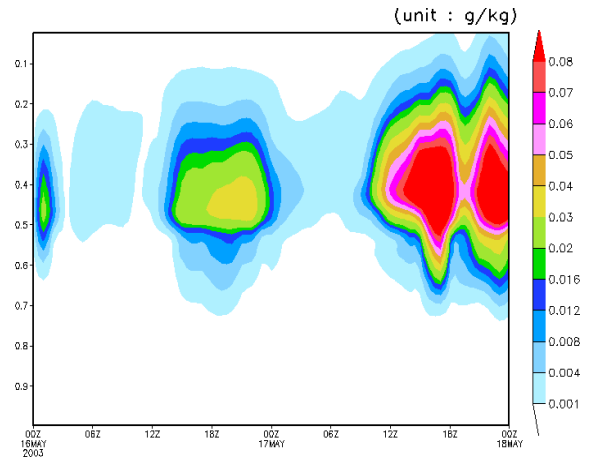


圖 4.48: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雪混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。
 (a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

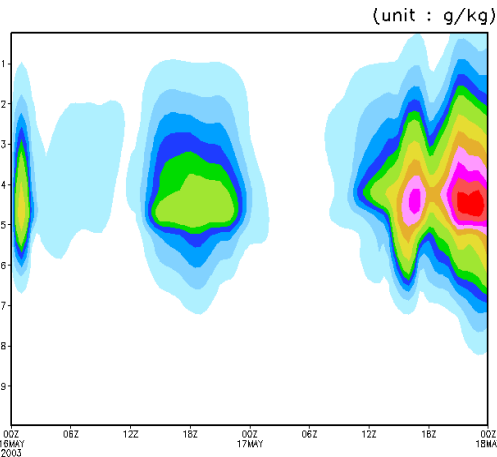
(a) CCN*0.01



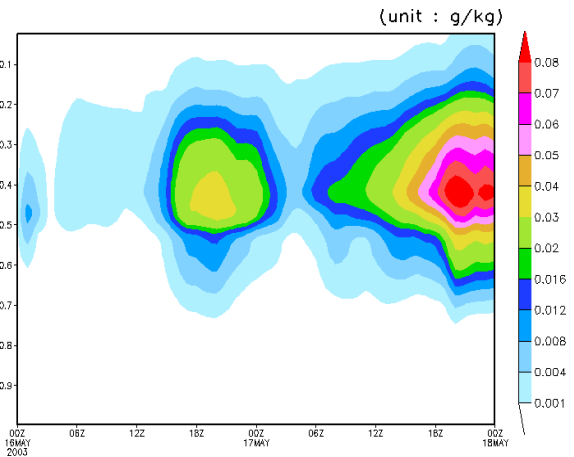
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

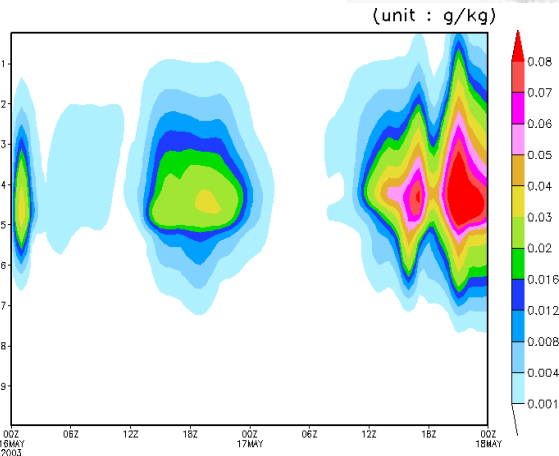


圖 4.49: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 雹混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。
 (a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

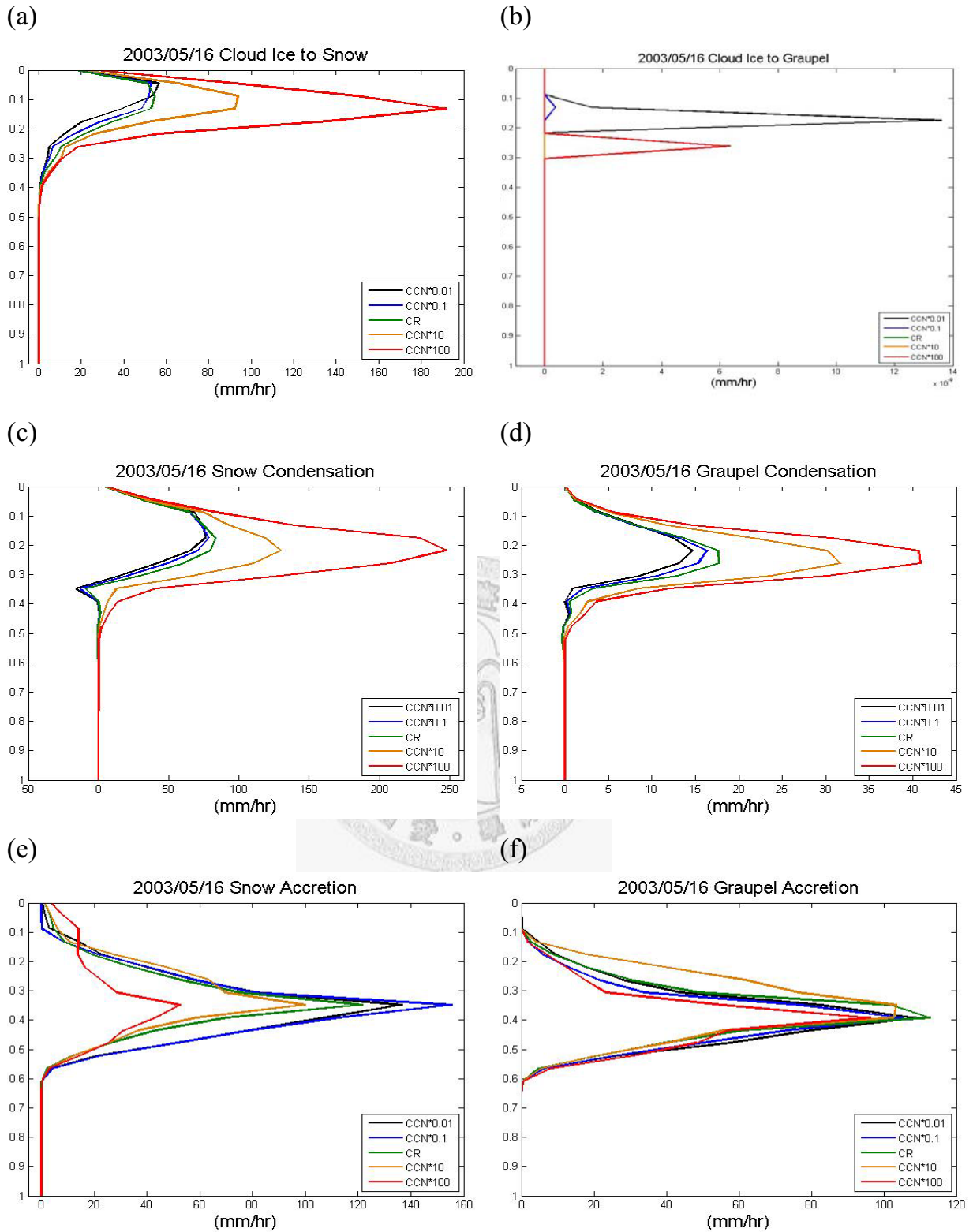
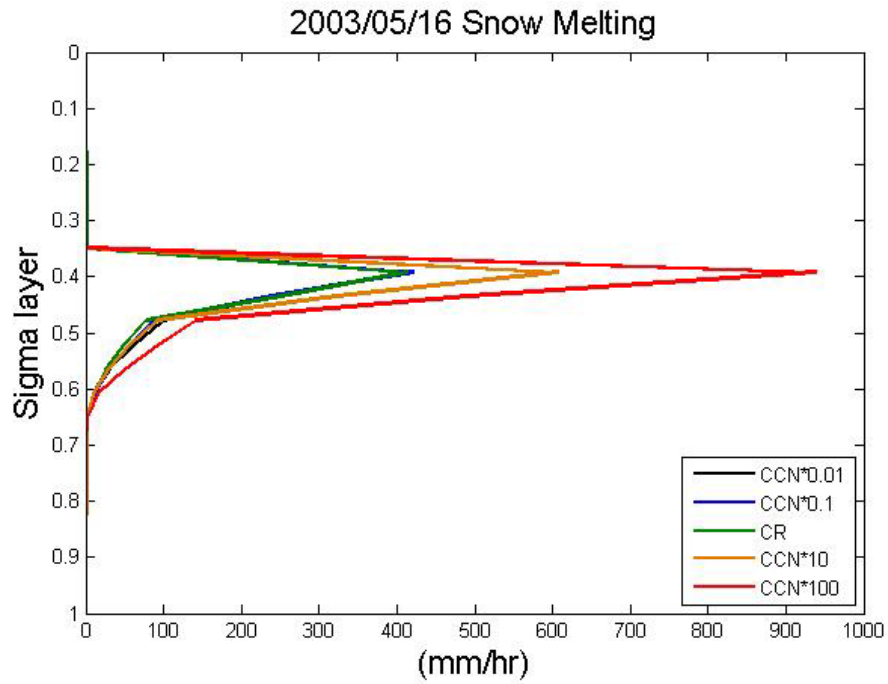
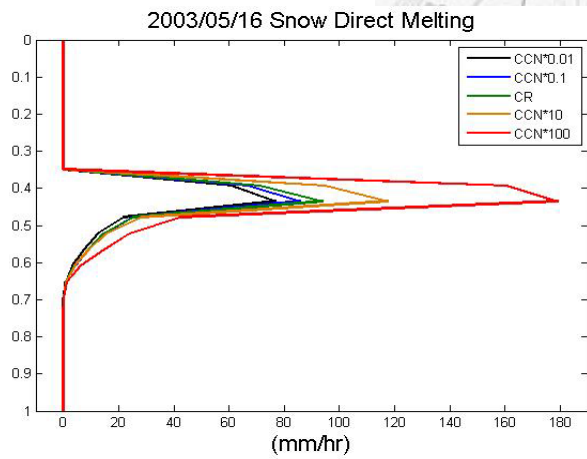


圖 4.50: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 IN 濃度固定下，(a)雲冰轉換成雪的生長率垂直分布圖;(b)雲冰轉換成電的生長率垂直分布圖;(c)雪凝結生長率; (d)電凝結生長率; (e)雪撞併過程生長率;(f)電撞併過程生長率。

(a)



(b)



(c)

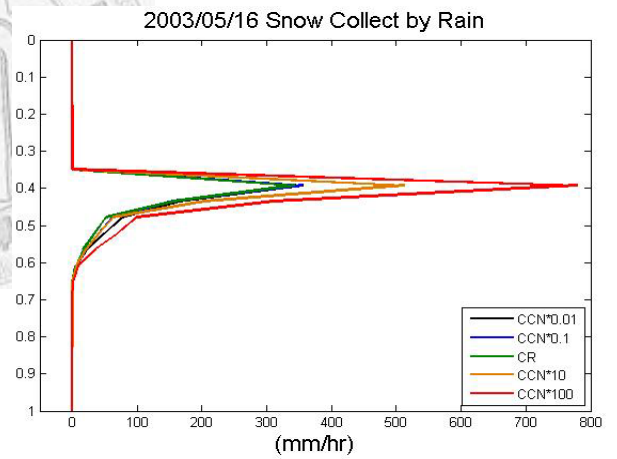
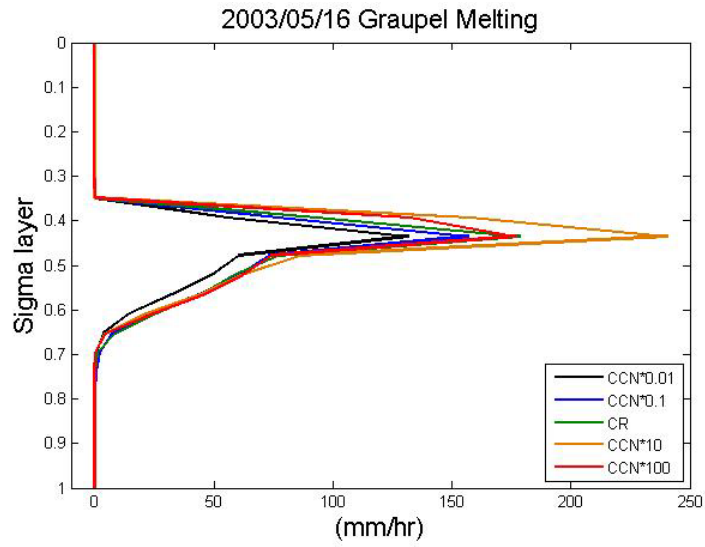
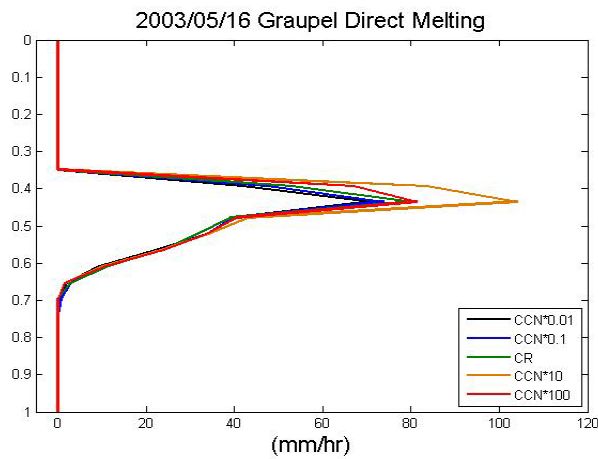


圖 4.51: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 IN 濃度固定下，(a)雪的總融化率;(b)雪的直接融化率;(c)融化的雪被雨滴收集的效率。

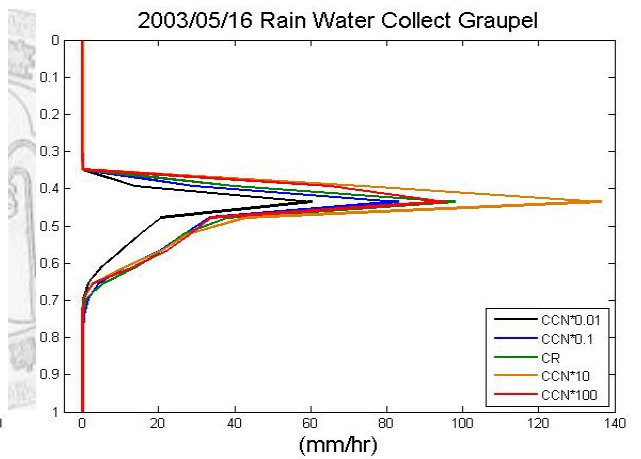
(a)



(b)



(c)



(d)

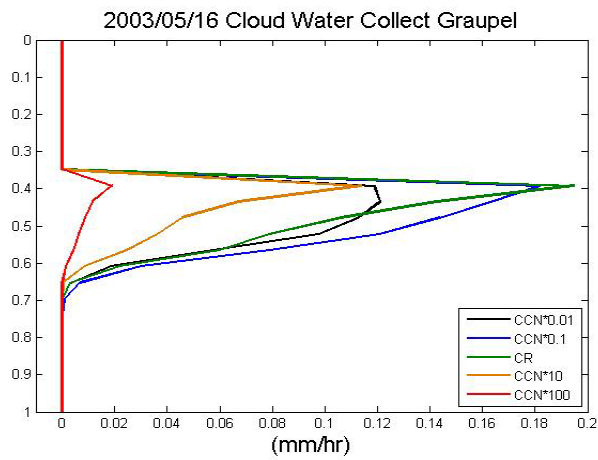


圖 4.52: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 IN 濃度固定下，(a)電的總融化率;(b)電的直接融化率;(c)融化的電被雨滴收集的效率;(d)融化的電被雲滴收集的效率。

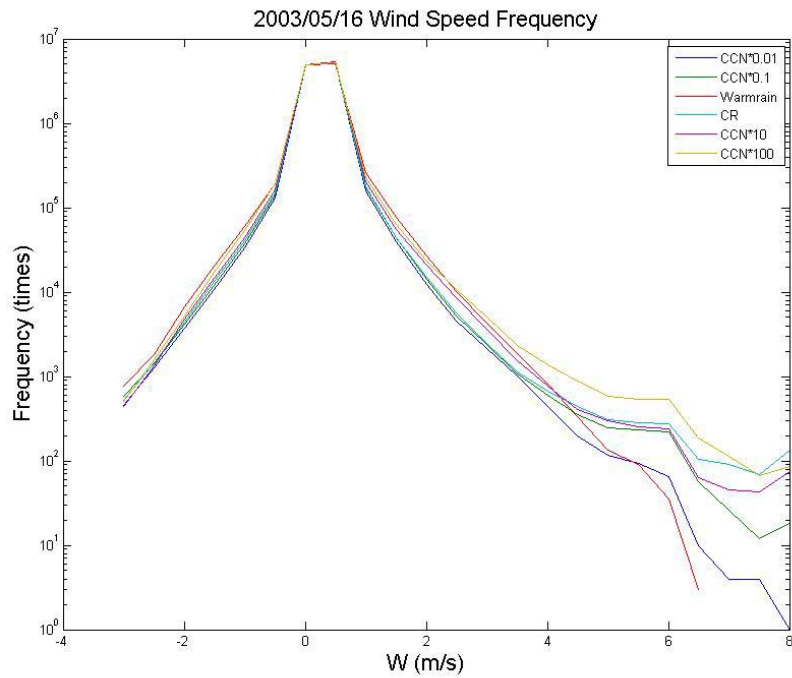


圖 4.53: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，更改 CCN 數量濃度所模擬出在 48 小時內，-3 m/s ~ 8 m/s 每 0.5m/s 為一個區間，計算所有區間內風速出現的次數。

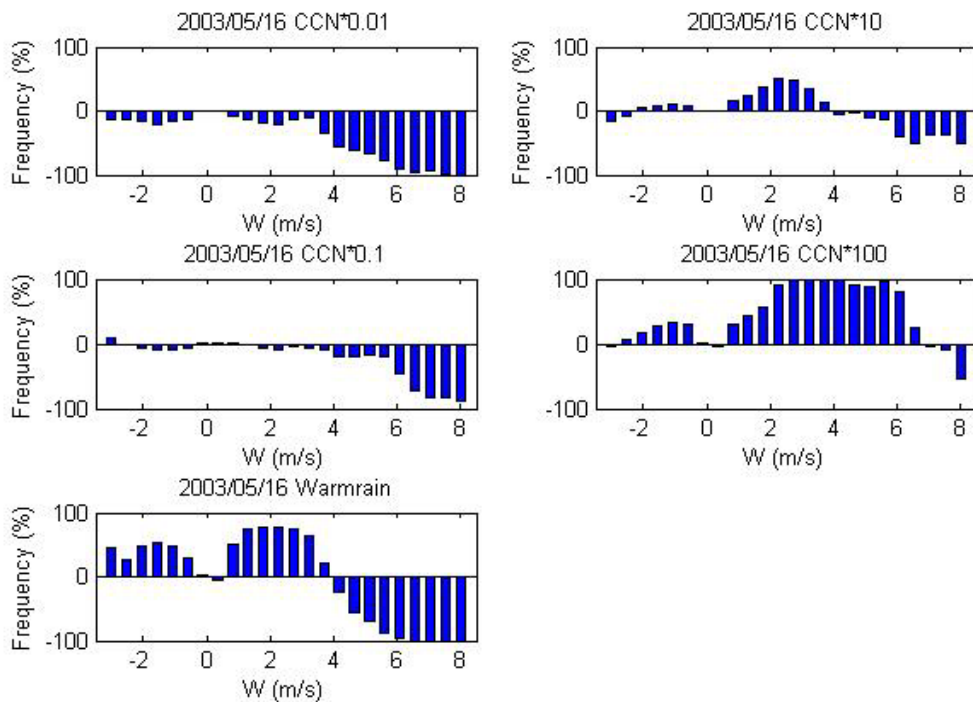
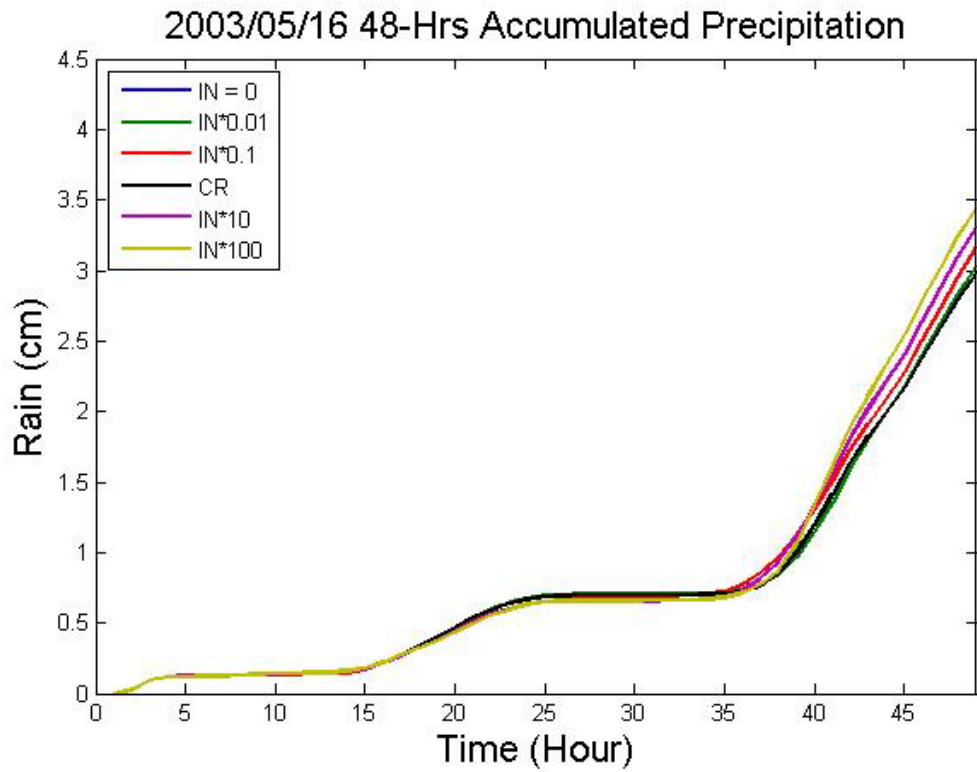


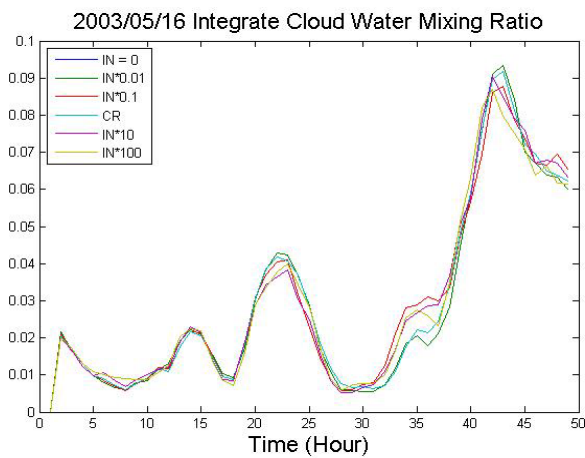
圖 4.54: 承圖 4.48，以 CR 為基準值所做出之距平圖。



	IN = 0	IN*0.01	IN*0.1	CR	IN*10	IN*100
Rain (cm)	2.98075	3.02679	3.16925	2.98088	3.30543	3.44049

圖 4.55 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，更改 IN 數量濃度所模擬出之 48 小時累積降雨量圖。

(a)



(b)

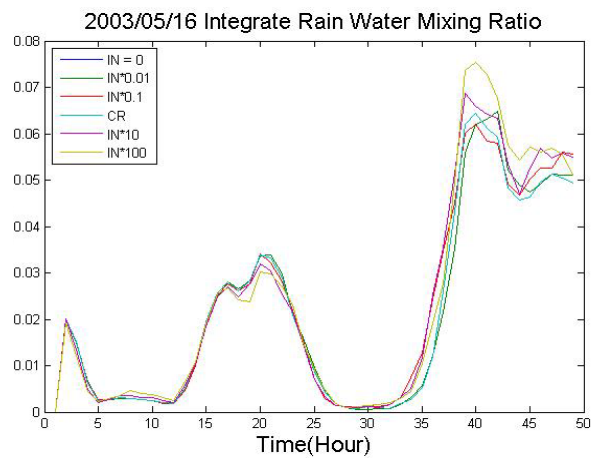
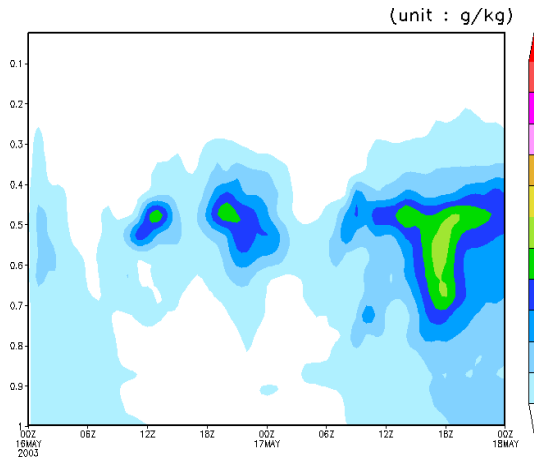
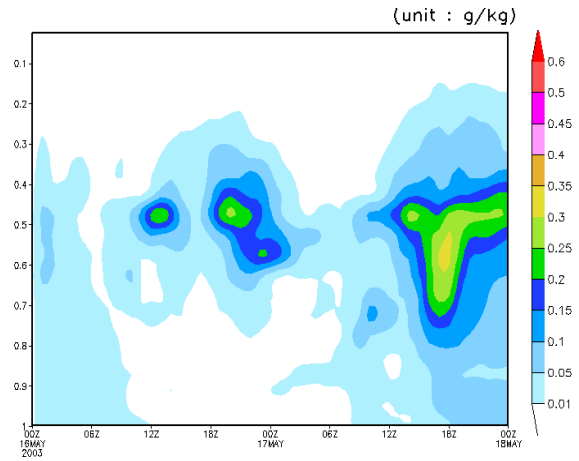


圖 4.56: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，更改 IN 數量濃度所模擬(a) 整層雲水厚度；(b)整層雨水厚度。

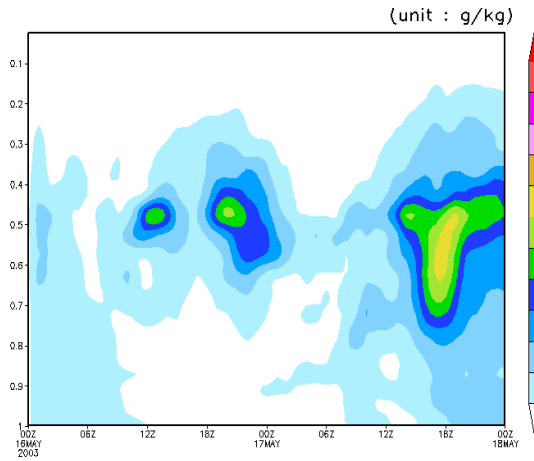
(a) IN = 0



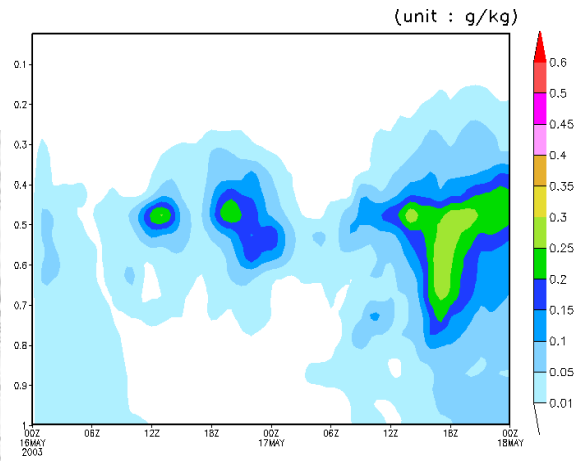
(d) CR



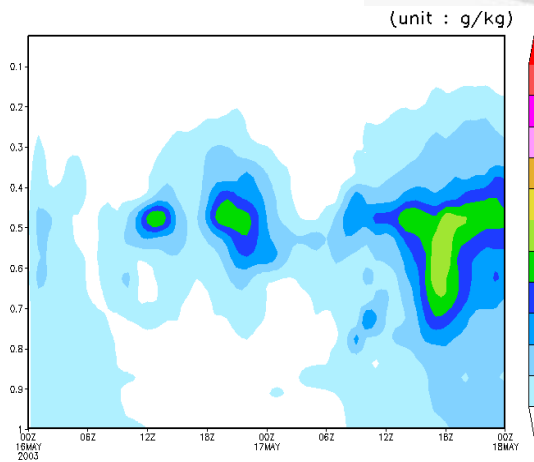
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

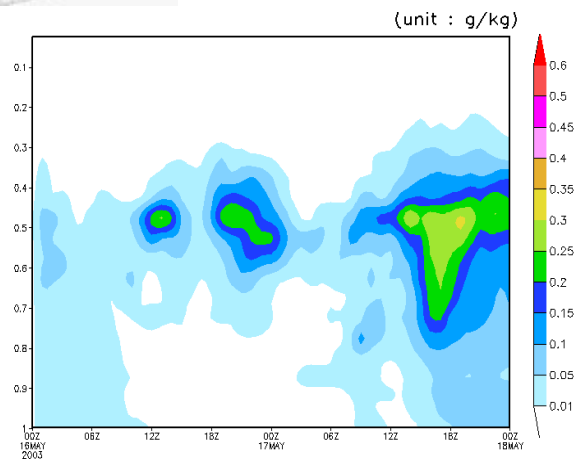
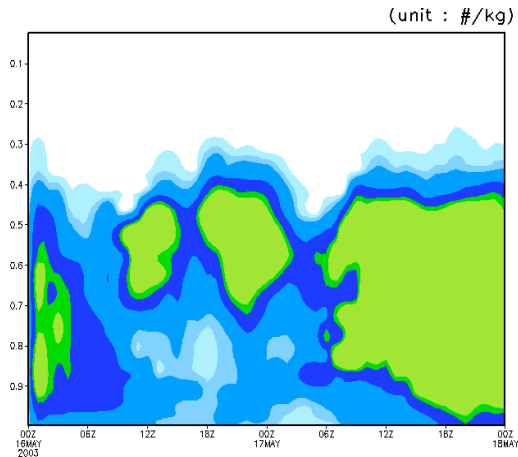
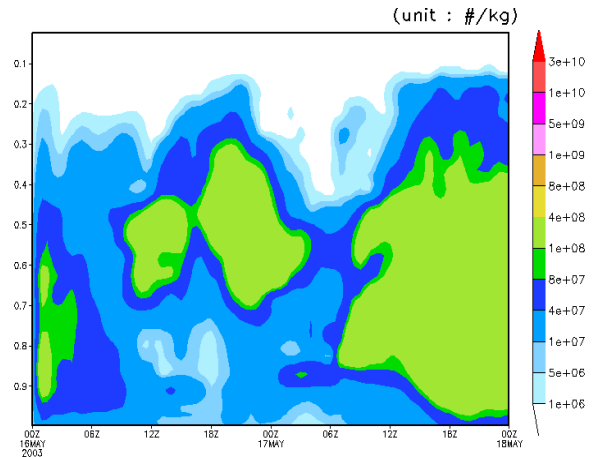


圖 4.57 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，雲水混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a)IN=0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

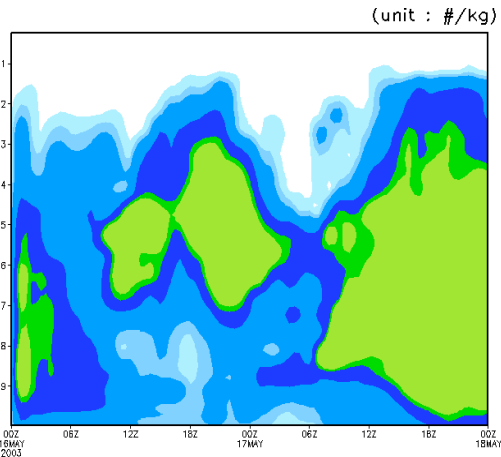
(a) IN = 0



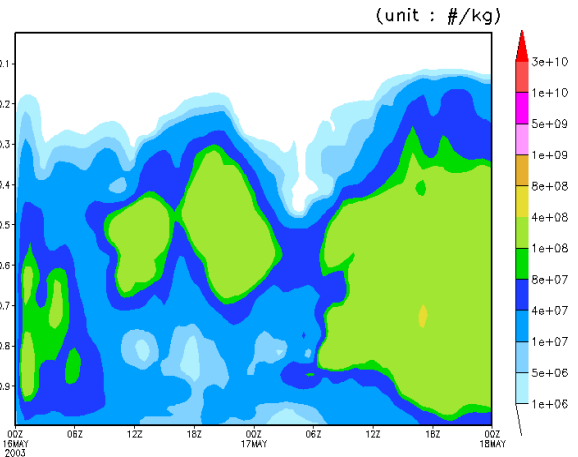
(d) CR



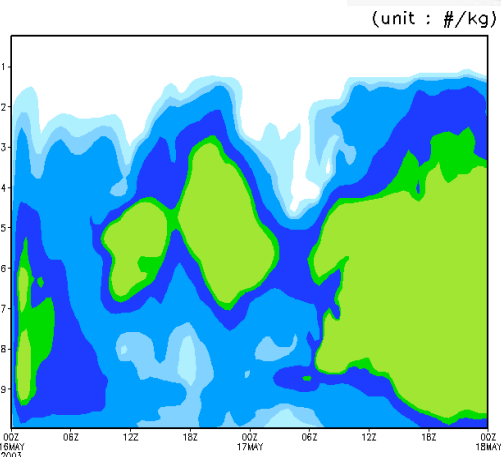
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

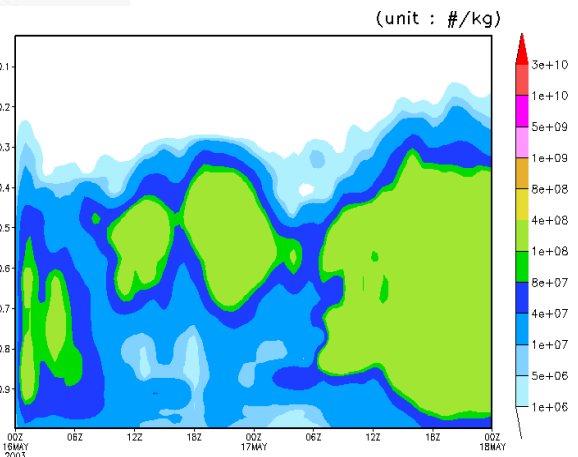
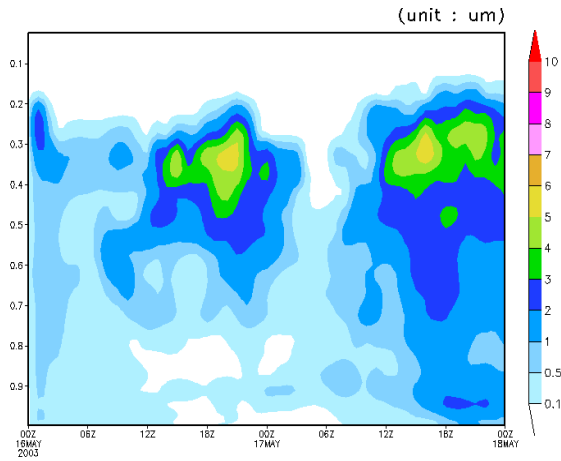
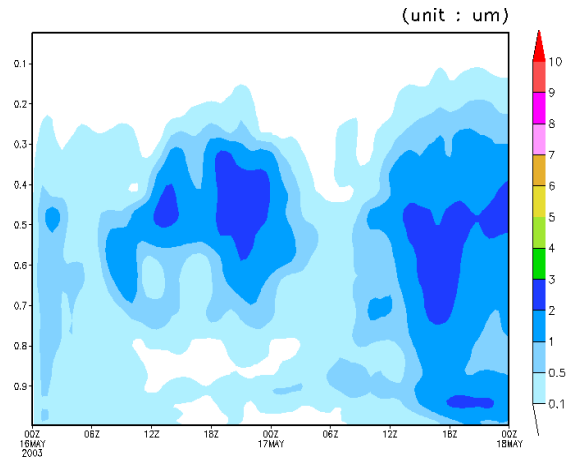


圖 4.58 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，雲滴數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a)IN=0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

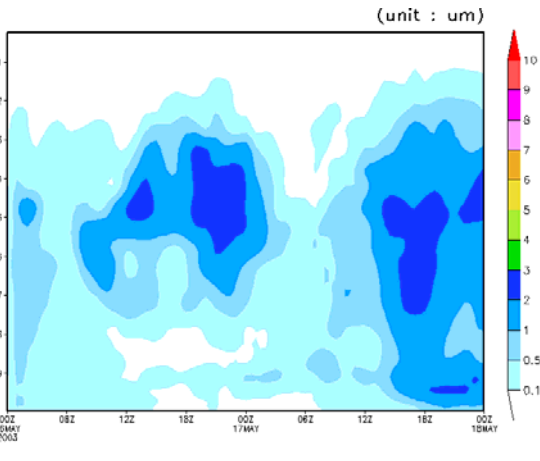
(a) $IN = 0$



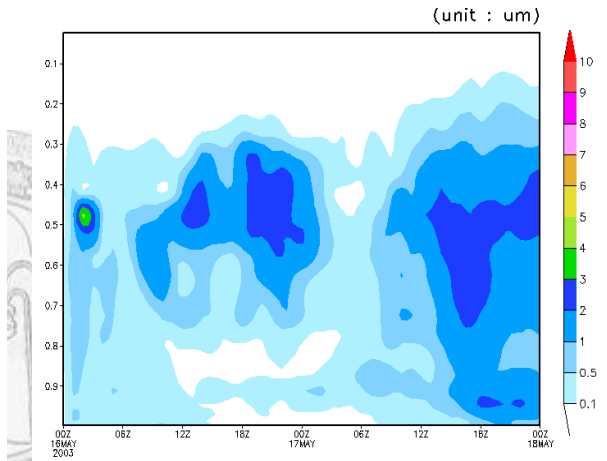
(d) CR



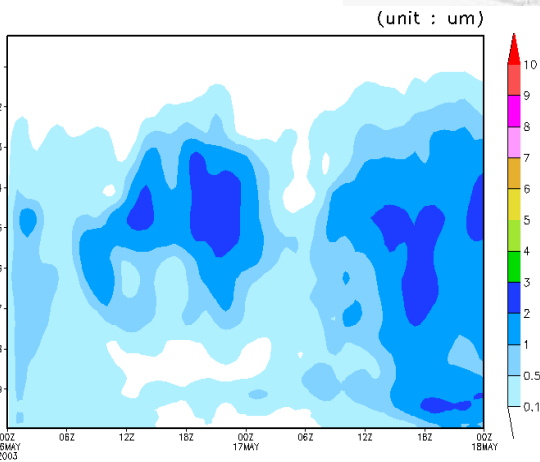
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

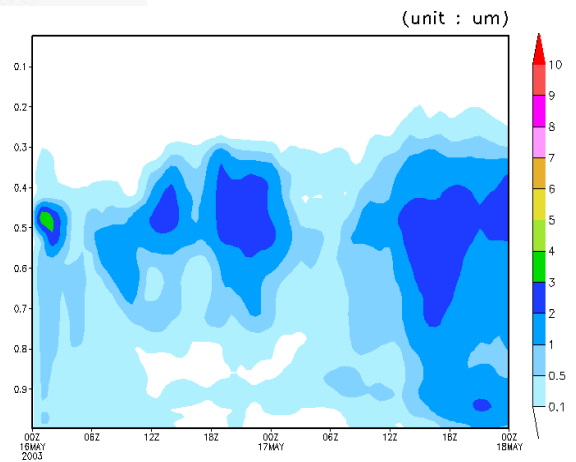
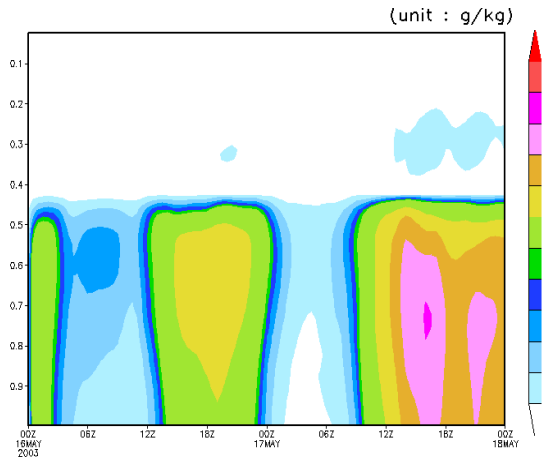
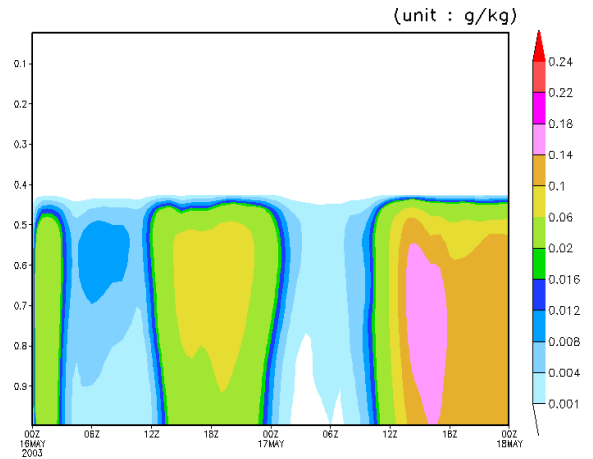


圖 4.59 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，雲滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a) $IN=0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

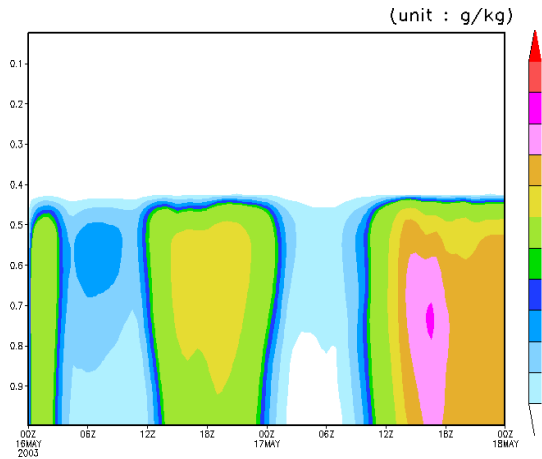
(a) IN = 0



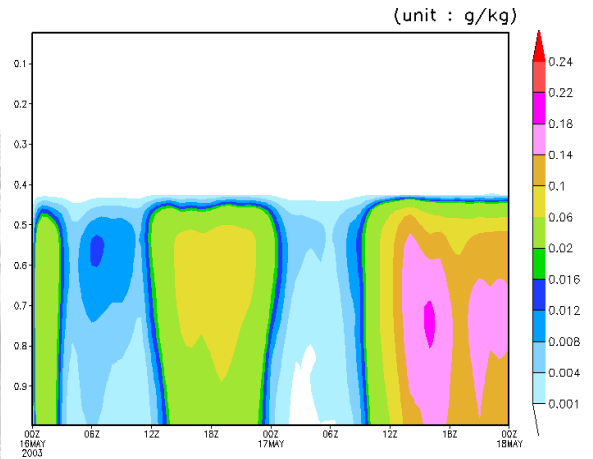
(d) CR



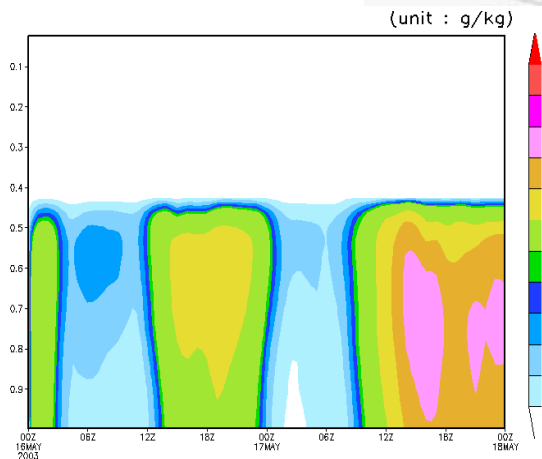
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

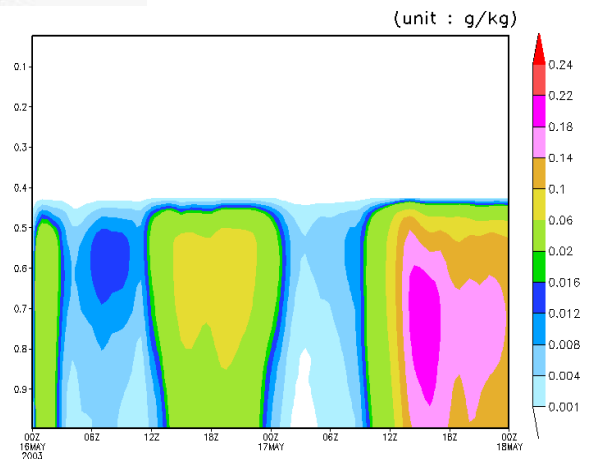
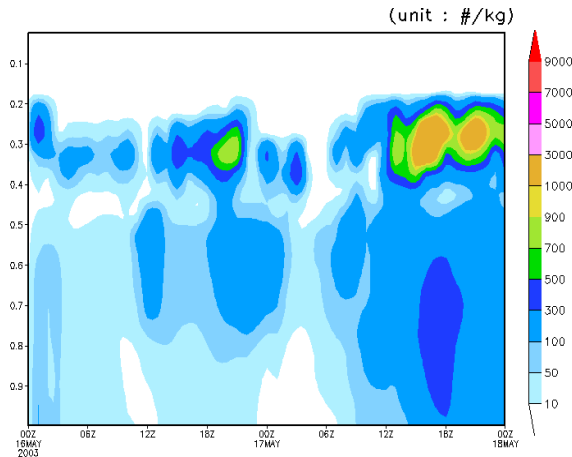
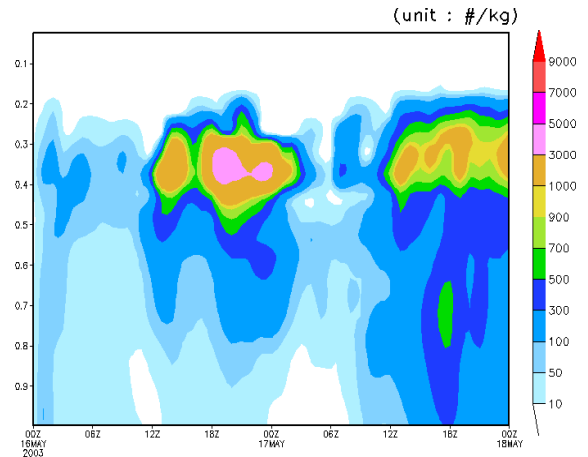


圖 4.60: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 雨水混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。 (a) IN=0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

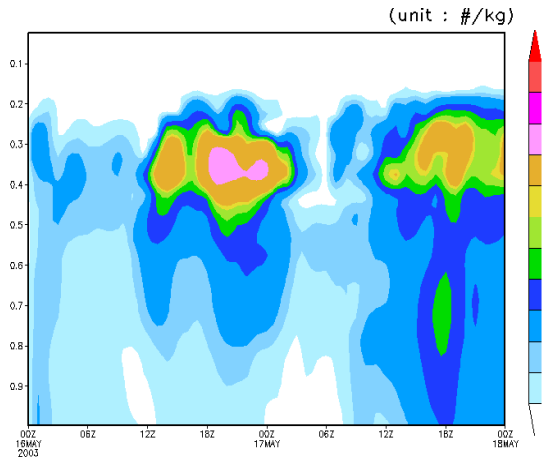
(a) $IN = 0$



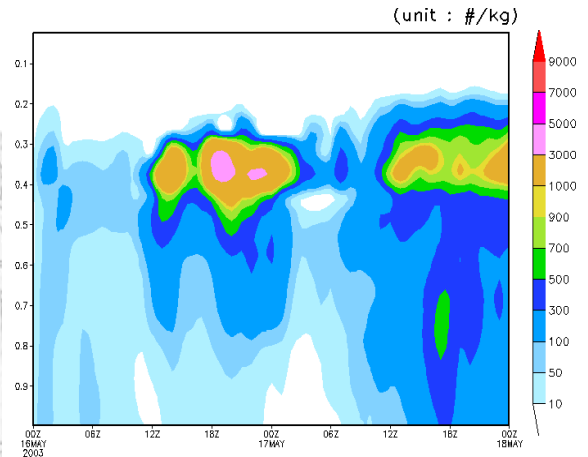
(d) CR



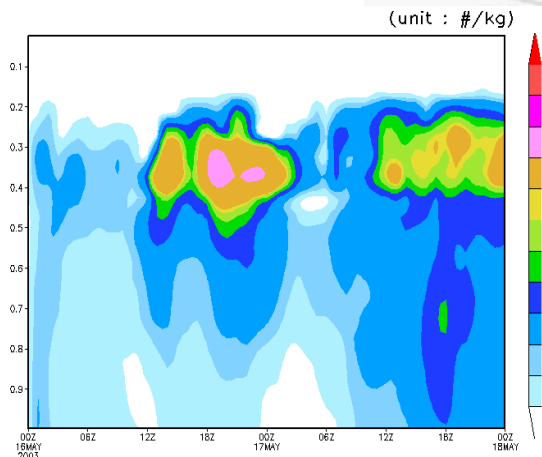
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

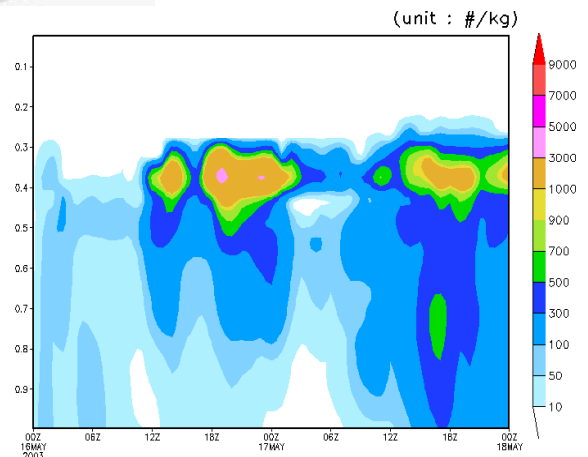
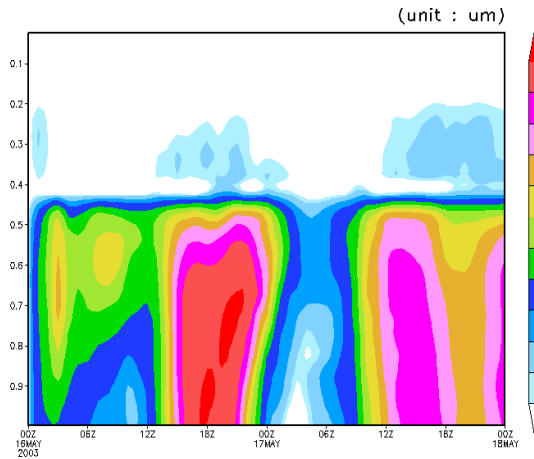
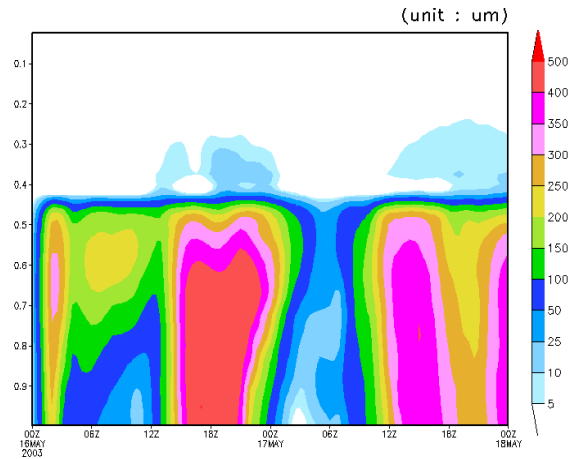


圖 4.61: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 雨滴數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) $IN=0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

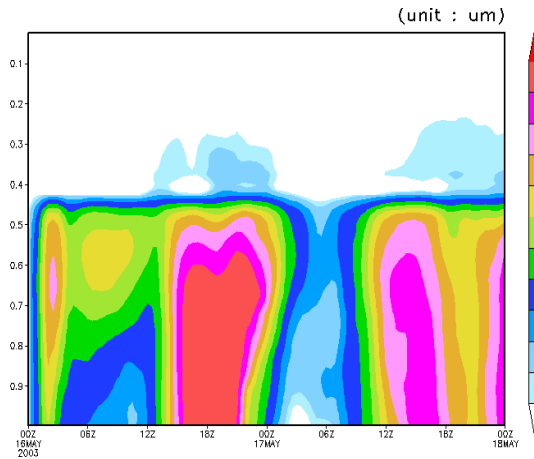
(a) $IN = 0$



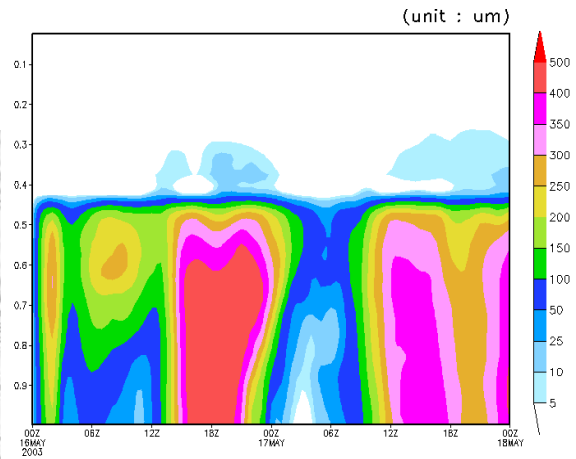
(d) CR



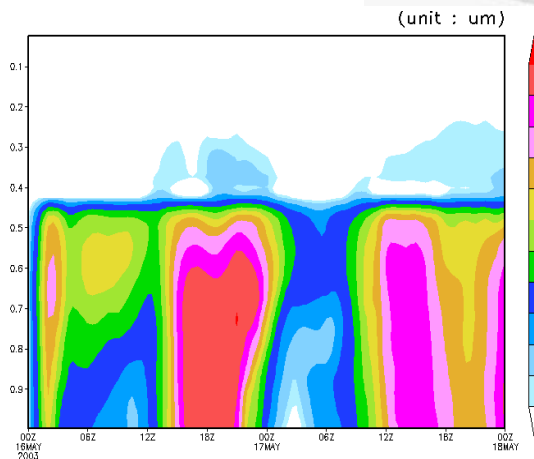
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

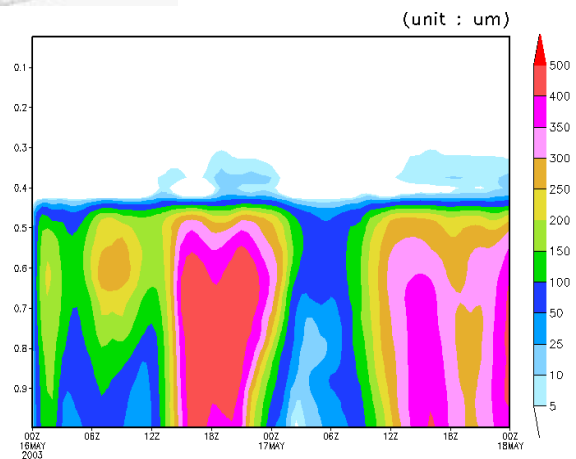
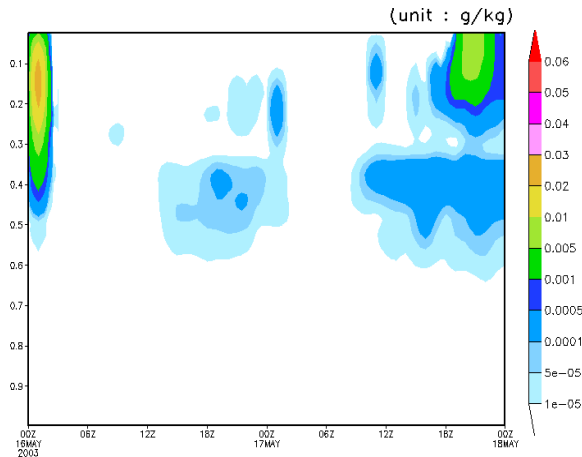
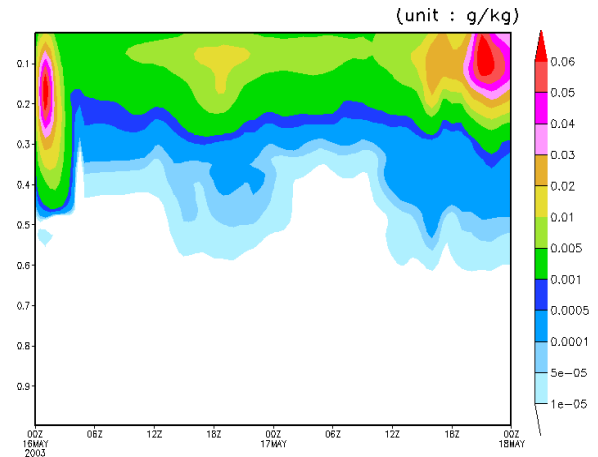


圖 4.62: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, 雨滴粒徑大小隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a) $IN=0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d) 實驗控制組 CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

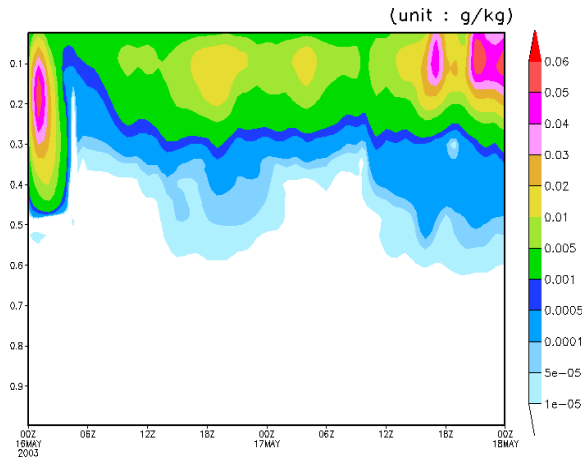
(a) IN = 0



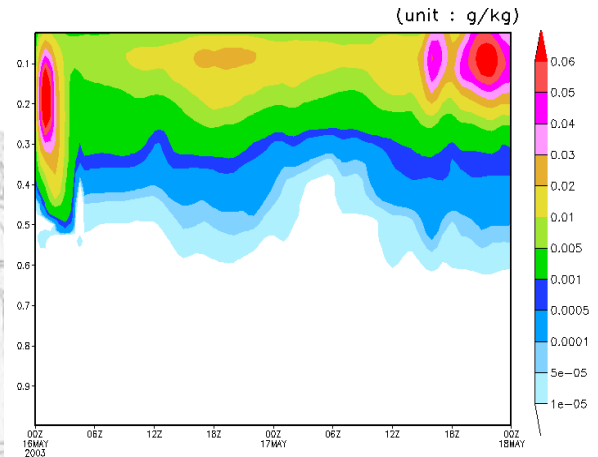
(d) CR



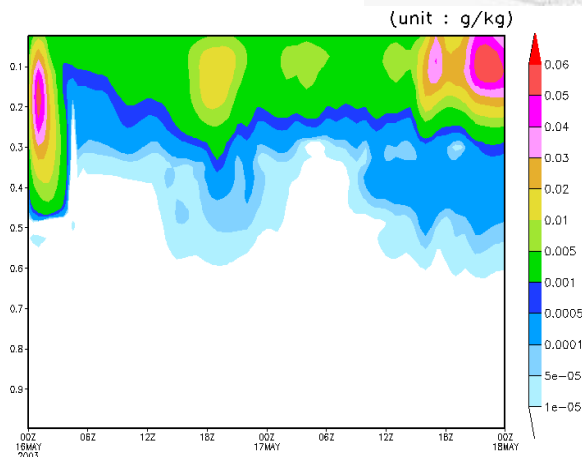
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

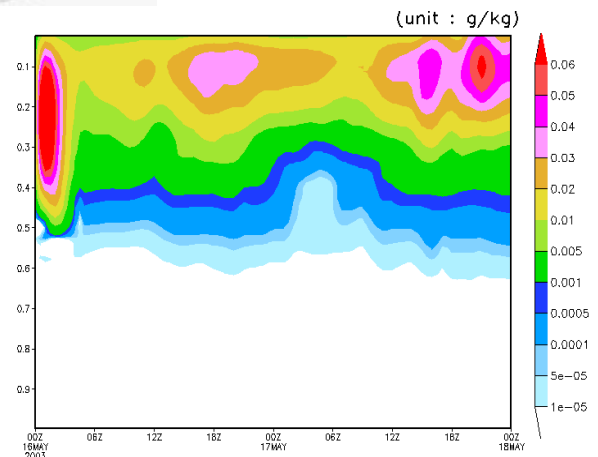
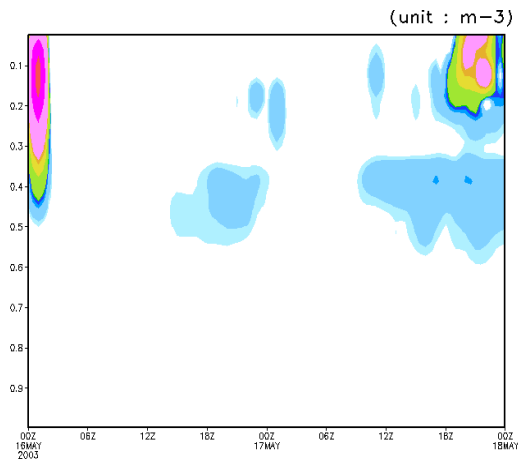
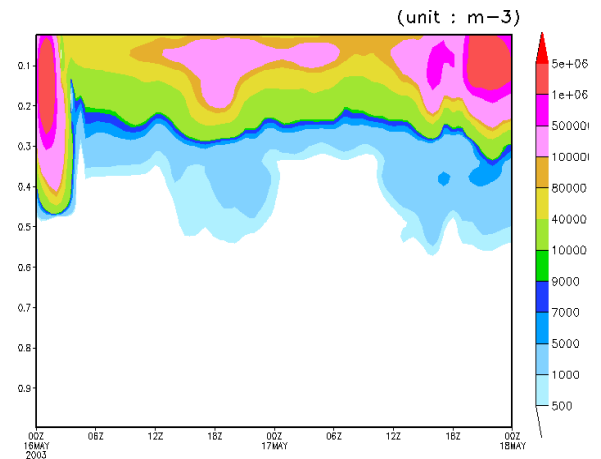


圖 4.63: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，雲冰混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a)IN=0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

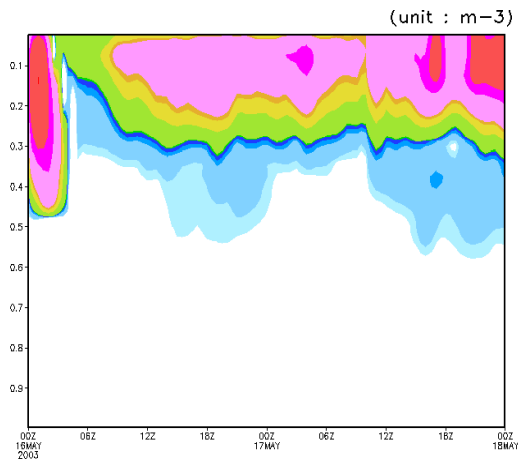
(a) IN = 0



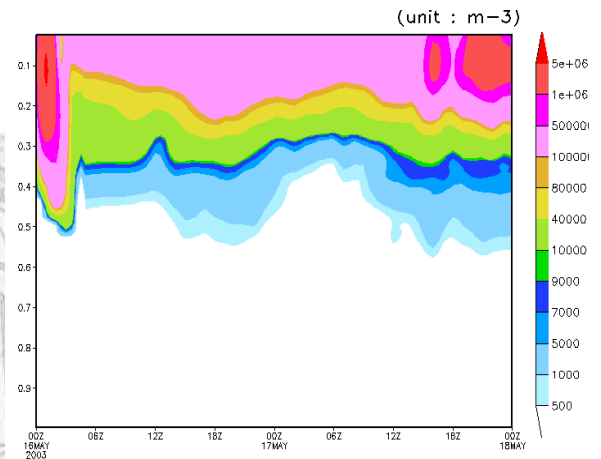
(d) CR



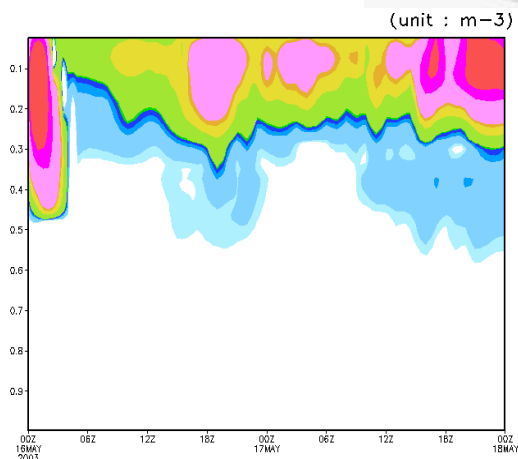
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

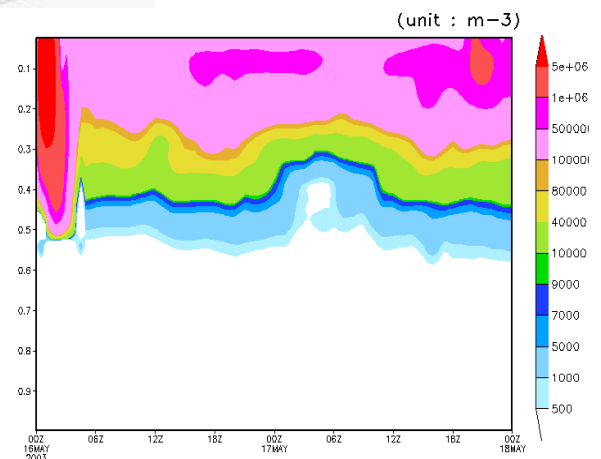


圖 4.64: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 IN 濃度固定下, 冰晶數量濃度隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均), 縱座標為 Sigma 座標。(a)IN=0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

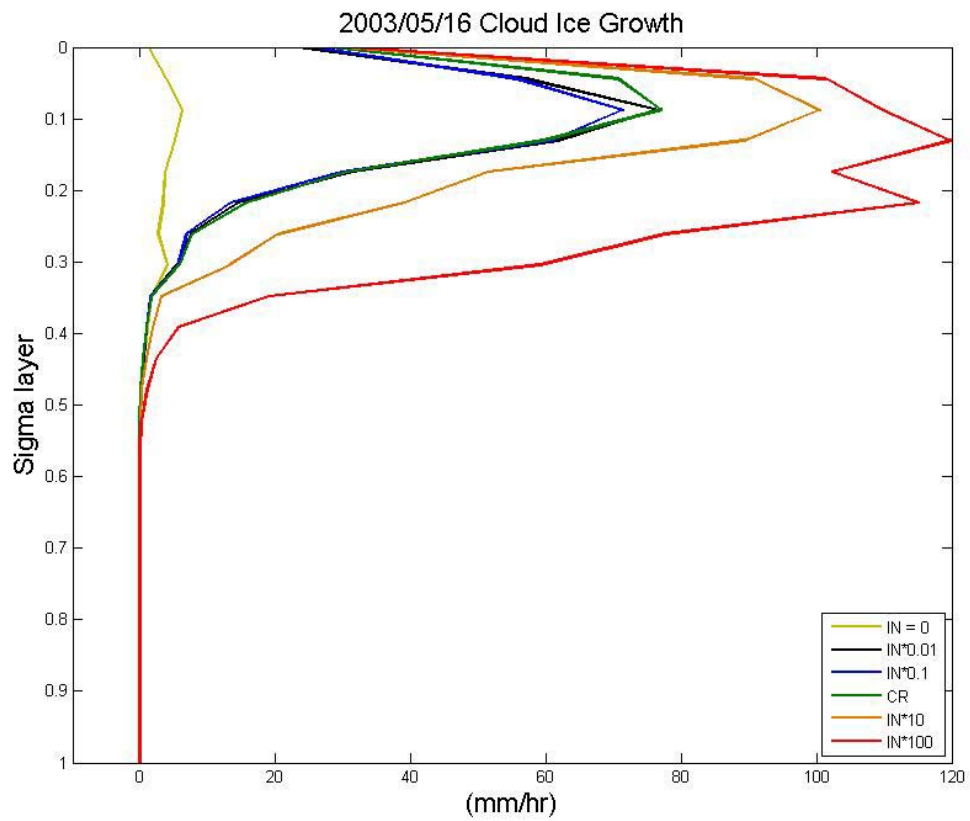
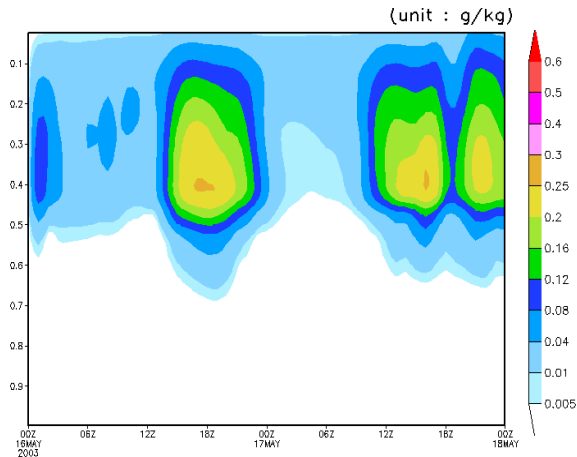
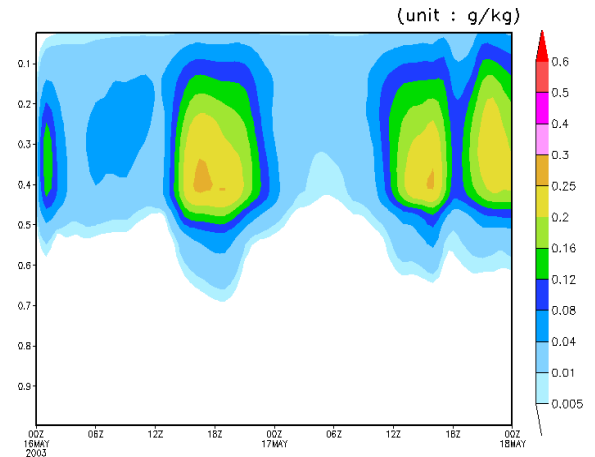


圖 4.65: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 CCN 濃度固定下，雲冰生長率垂直分布圖。

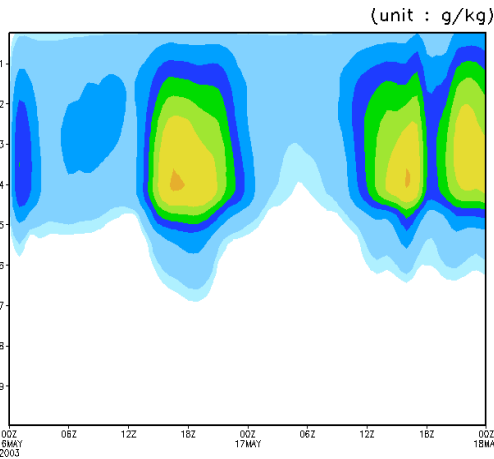
(a) IN = 0



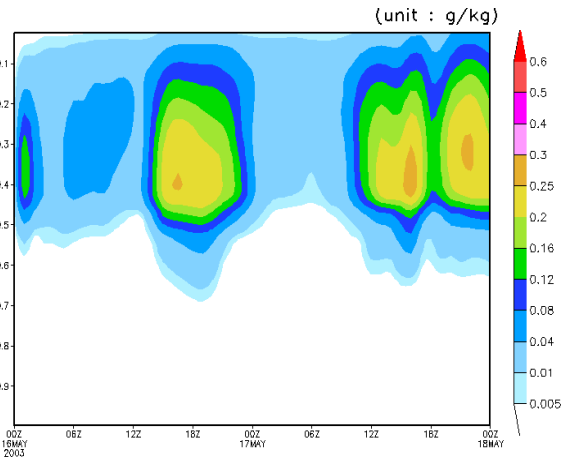
(d) CR



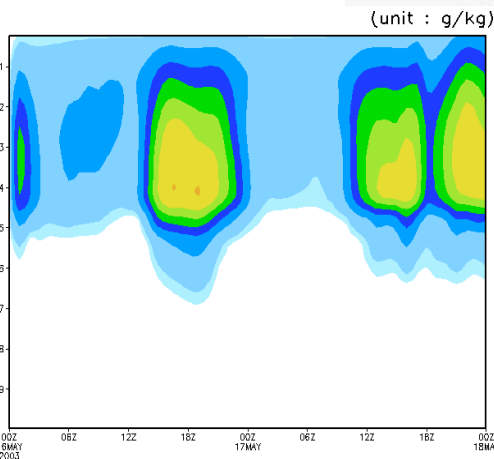
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

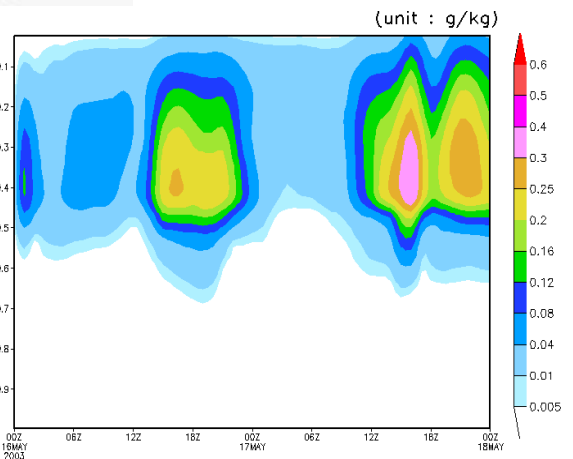
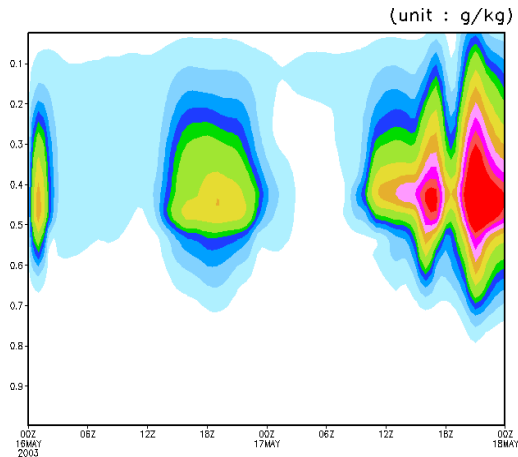
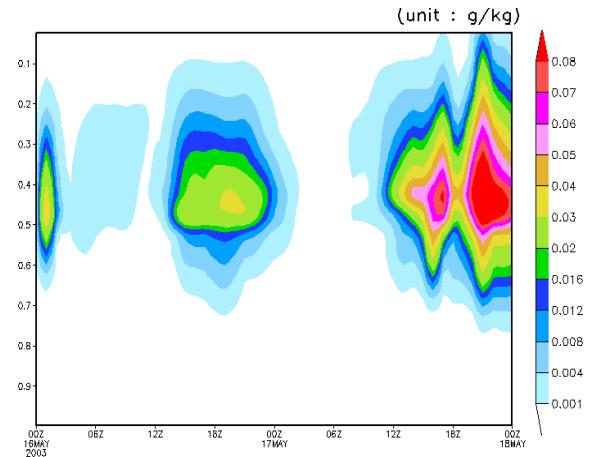


圖 4.66 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，雪混合比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a) IN=0; (b) IN*0.01; (c) IN*0.1; (d) 實驗控制組 CR; (e) IN*10; (f) IN*100。

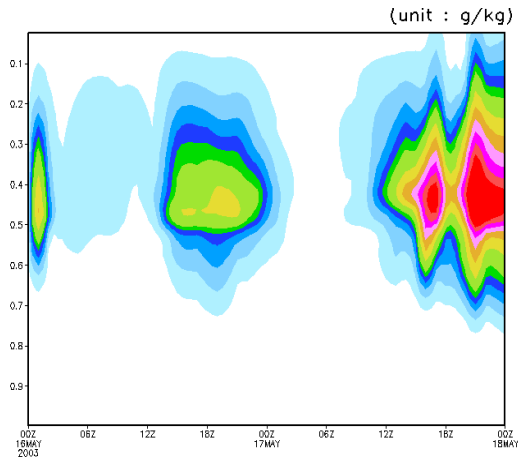
(a) IN = 0



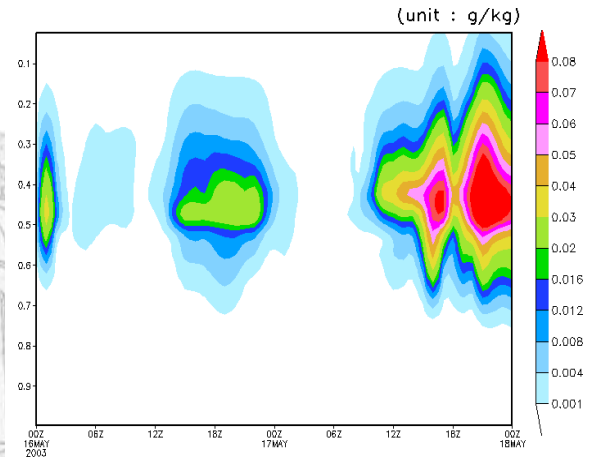
(d) CR



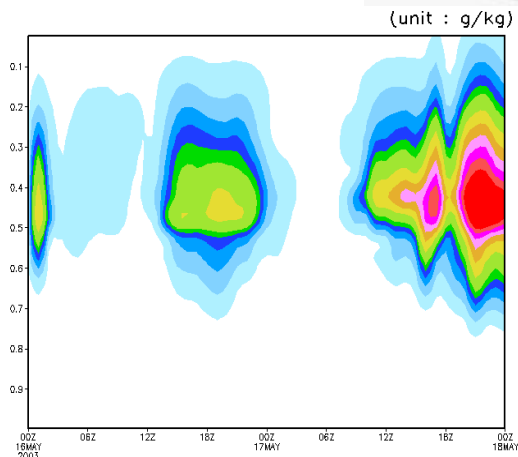
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

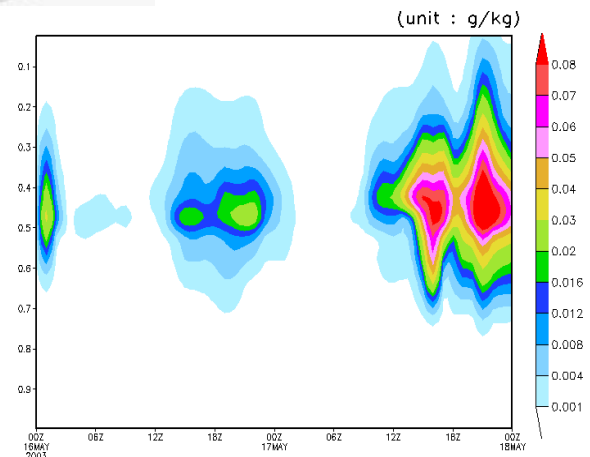


圖 4.67: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，在 CCN 濃度固定下，電混比隨時間、高度變化之結果(第四巢區域平均)，縱座標為 Sigma 座標。(a) CCN*0.01; (b) CCN*0.1; (c) 實驗控制組 CR; (d) CCN*10; (e) CCN*100。

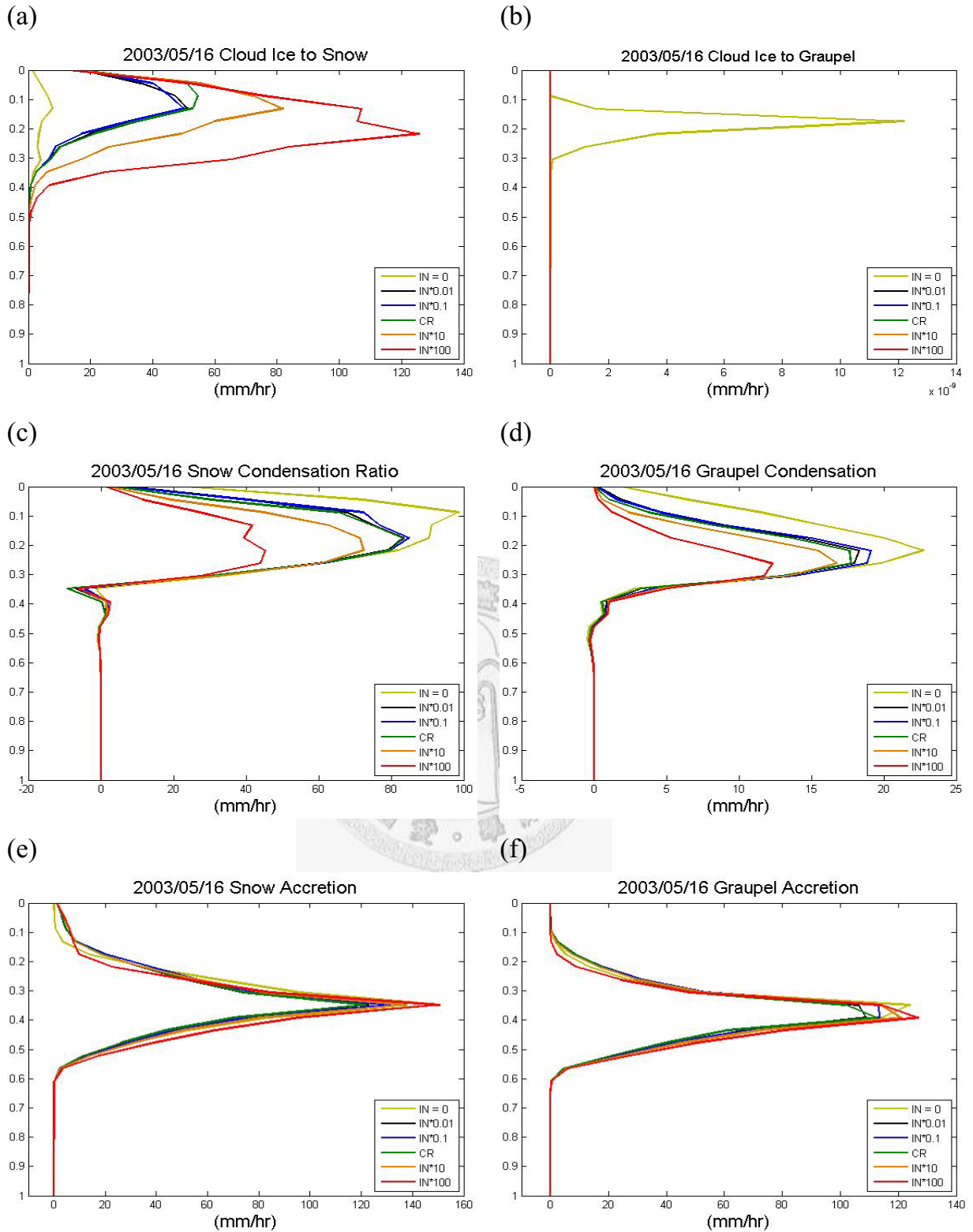
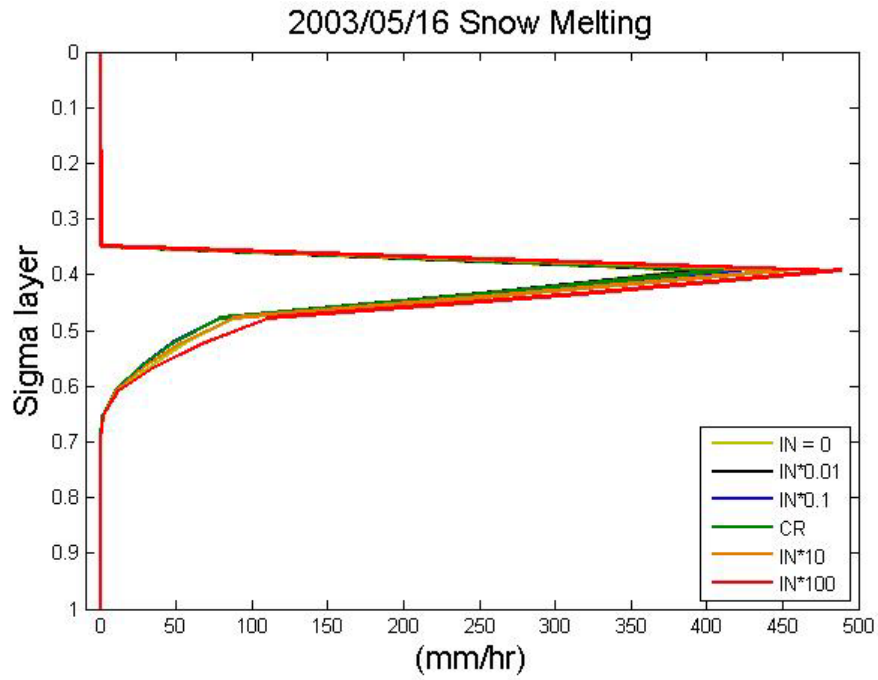
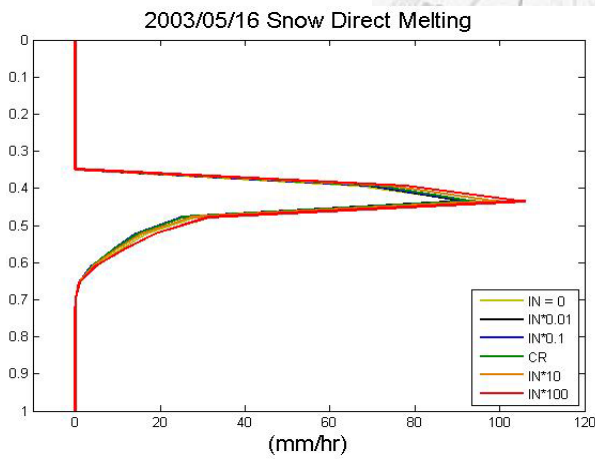


圖 4.68: 模擬 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 CCN 濃度固定下，(a)雲冰轉換成雪的生長率垂直分布圖;(b)雲冰轉換成電的生長率垂直分布圖;(c)雪凝結生長率; (d)電凝結生長率; (e)雪撞併過程生長率; (f)電撞併過程生長率。

(a)



(b)



(c)

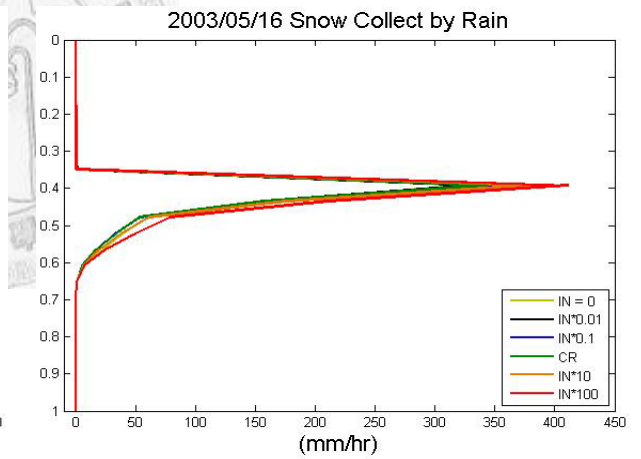
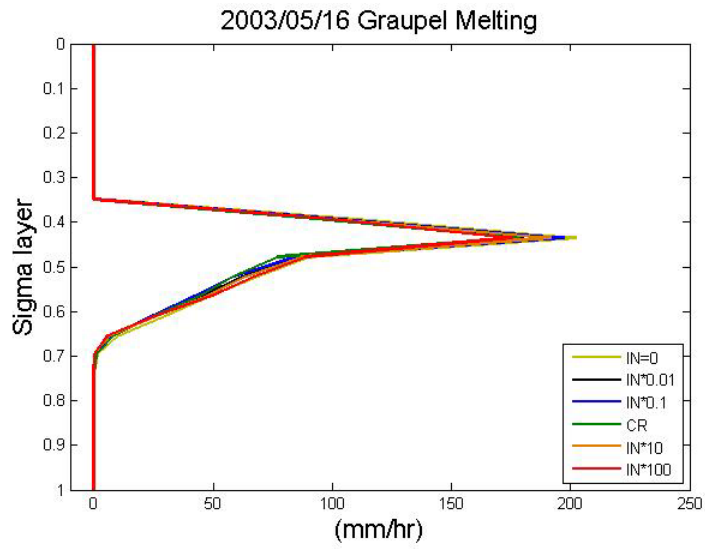
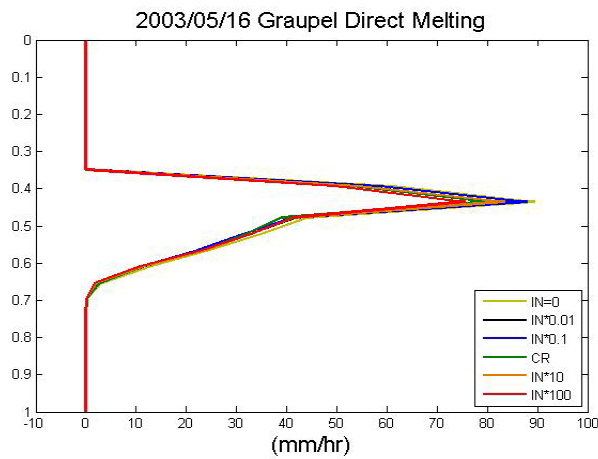


圖 4.69: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC，縱座標為 Sigma 座標，在 CCN 濃度固定下，(a)雪的總融化率;(b)雪的直接融化率;(c)融化的雪被雨滴收集的效率。

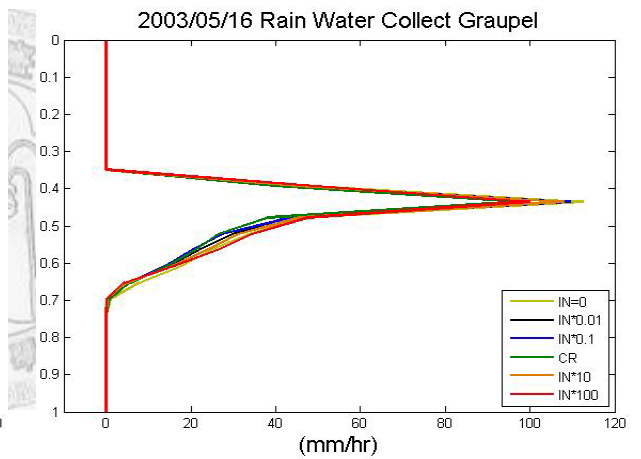
(a)



(b)



(c)



(d)

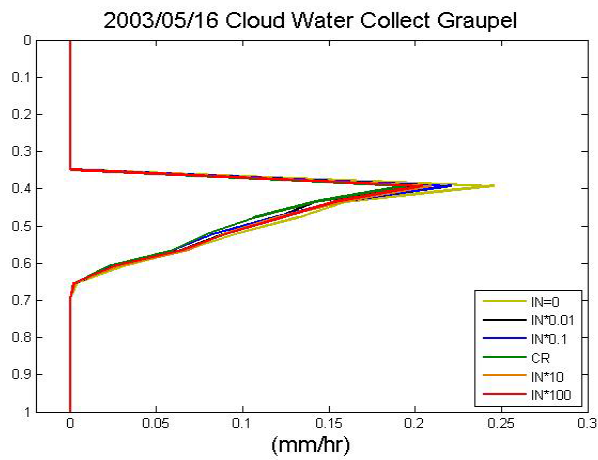


圖 4.70: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 在 CCN 濃度固定下, (a) 雹的總融化率; (b) 雹的直接融化率; (c) 融化的雹被雨滴收集的效率; (d) 融化的雹被雲滴收集的效率。

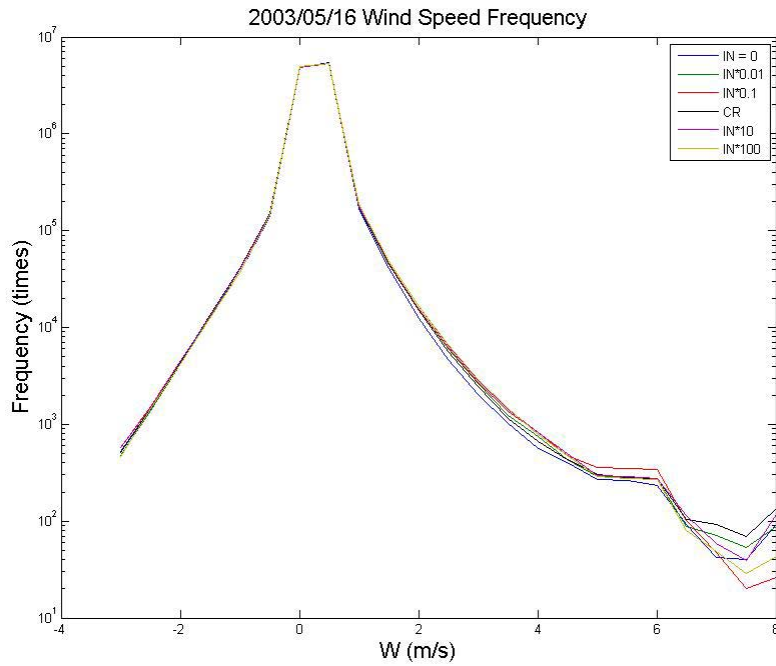


圖 4.71: 2003 年 5 月 16 日 00UTC 到 18 日 00UTC, 更改 IN 數量濃度所模擬出在 48 小時內, -3 m/s ~ 8 m/s 每 0.5m/s 為一個區間, 計算所有區間內風速出現的次數。

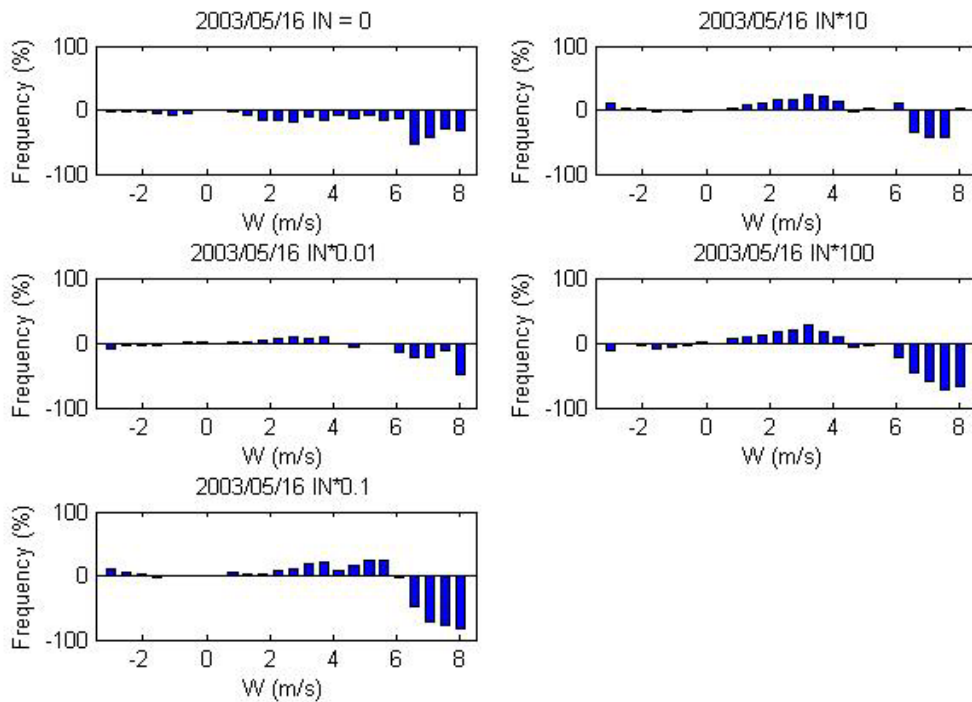
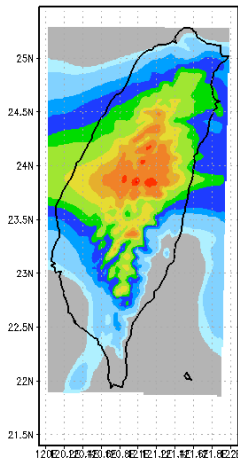


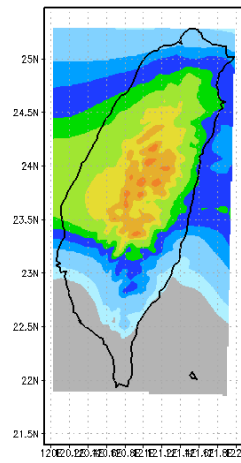
圖 4.72: 承圖 4.62, 以 CR 為基準值所做出之距平圖。

附錄 A：實驗一模擬結果補充

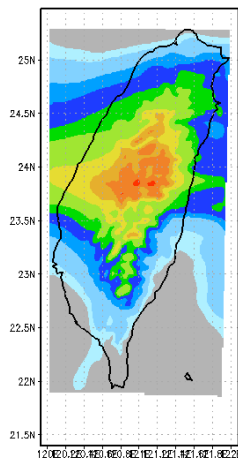
(a) CCN*0.01



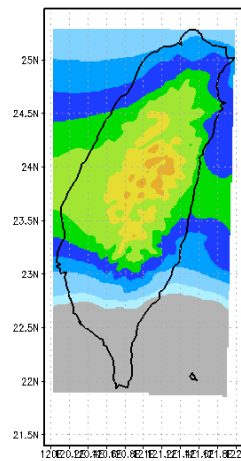
(d) CCN*10



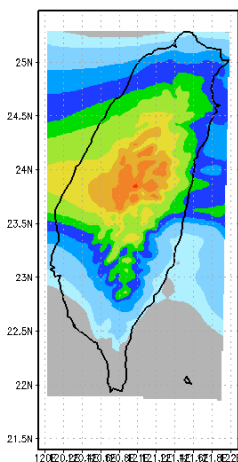
(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR



(f)

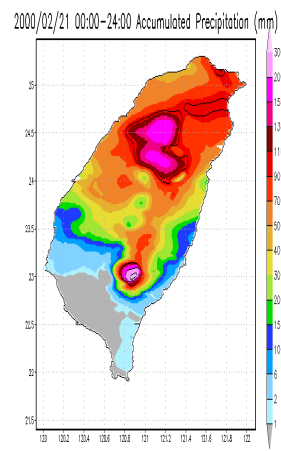
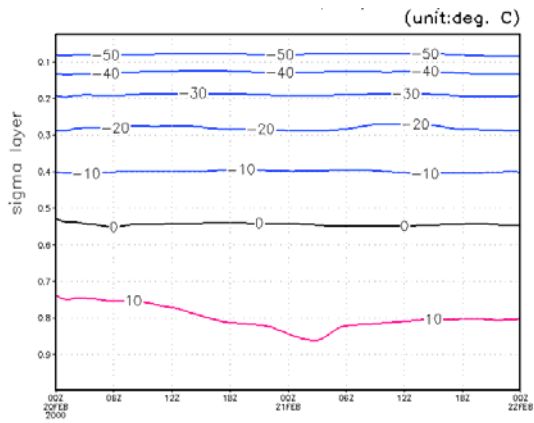
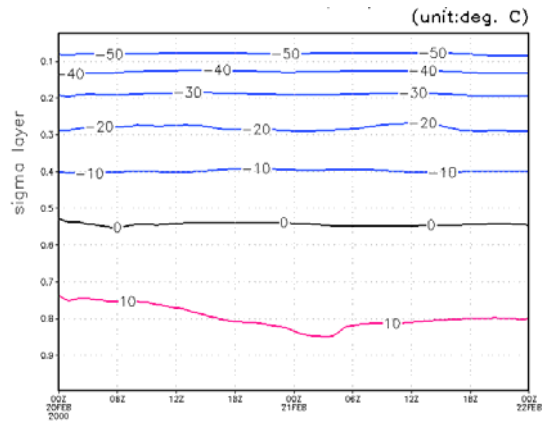


圖 A.1: IN 濃度固定下之 24 小時累積降雨量模擬結果。模擬 2000 年 2 月 20 日個案第 16 到 40 個小時。(a)CCN*0.01; (b)CCN*0.1; (c)CR; (d)CCN*10; (e)CCN*100; (f)中央氣象局地面累積雨量圖 2000 年 2 月 21 日 00:00 至 21 日 24:00。

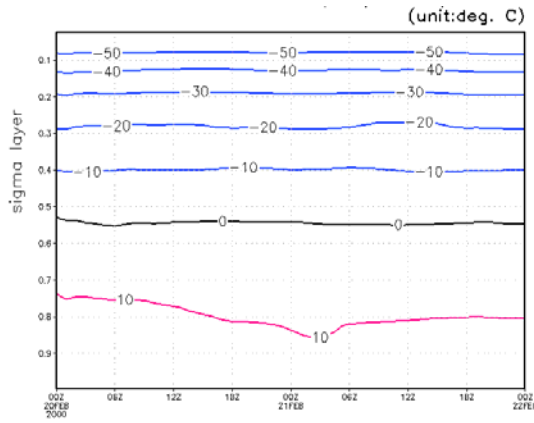
(a) CCN*0.01



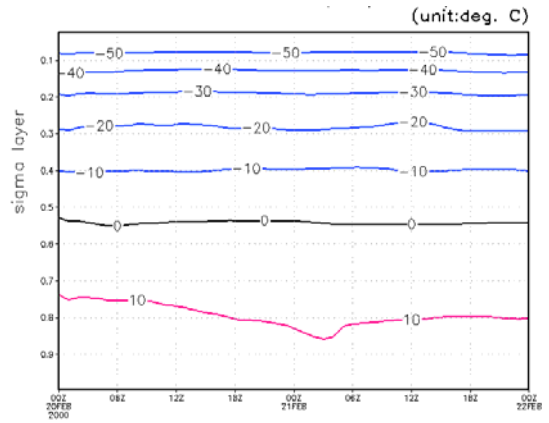
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

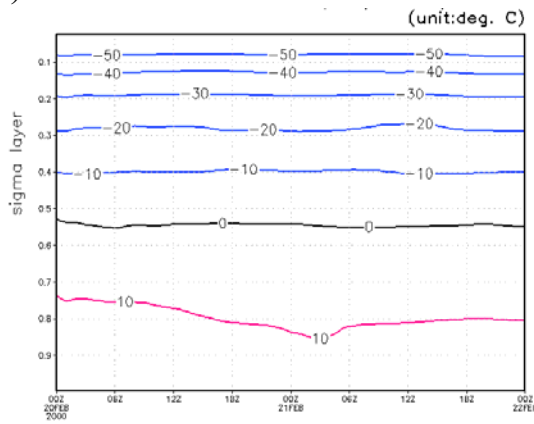
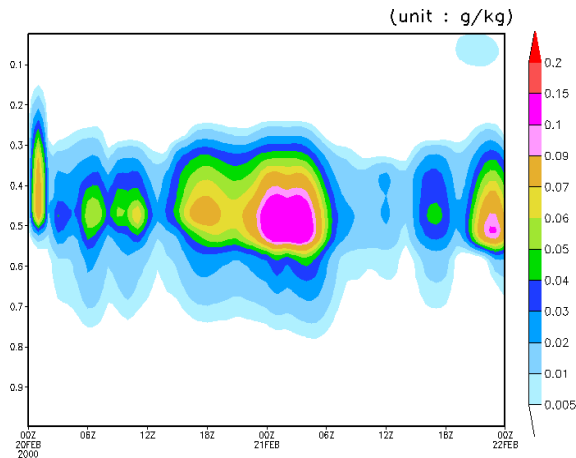
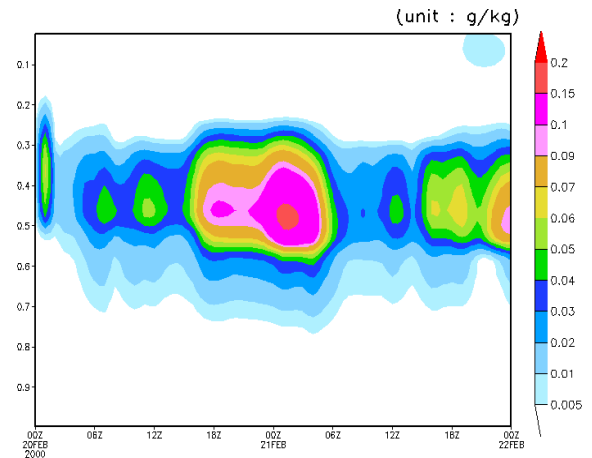


圖 A.2: IN 濃度固定下，2000 年 2 月 20 日個案平均溫度模擬結果，第四巢區域平均。(a)CCN*0.01; (b)CCN*0.1; (c)CR; (d)CCN*10; (e)CCN*100。

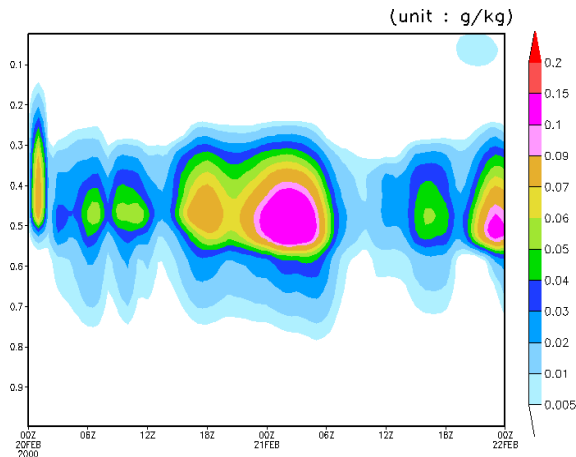
(a) CCN*0.01



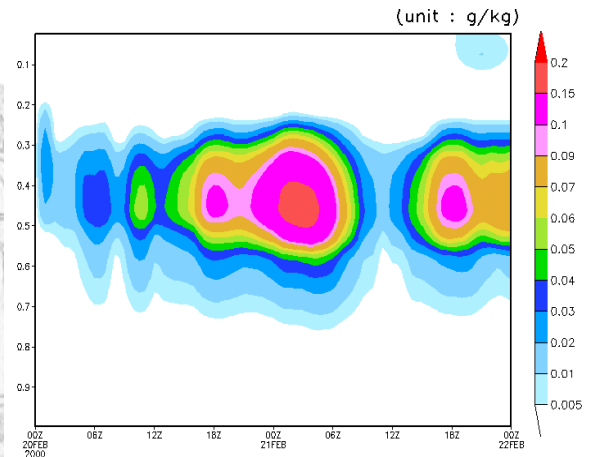
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

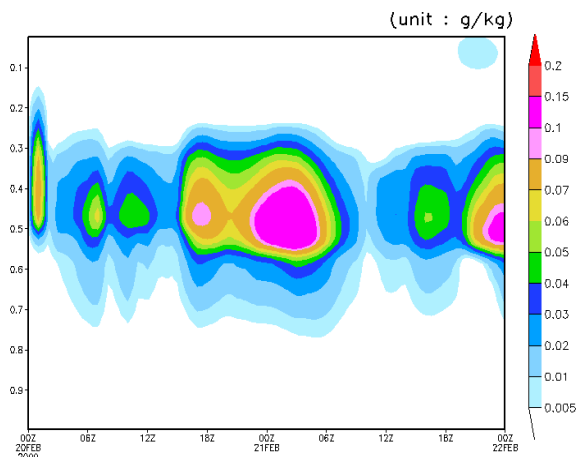
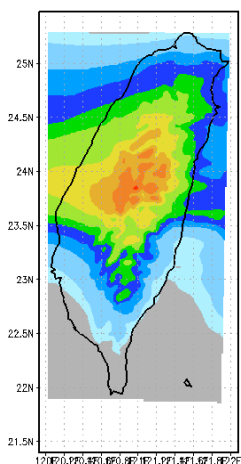


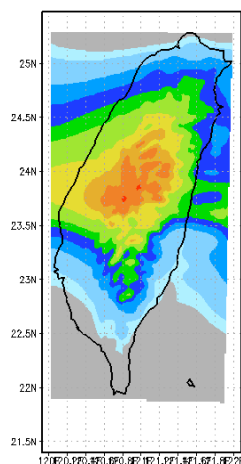
圖 A.3: IN 濃度固定下，2000 年 2 月 20 日個案之總冰相粒子混合比隨時間、高度變化之模擬結果，第四巢區域平均。(a)CCN*0.01; (b)CCN*0.1; (c)CR; (d)CCN*10; (e)CCN*100。

附錄 B：實驗二模擬結果補充

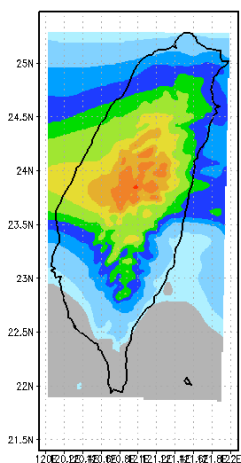
(a) IN*0.01



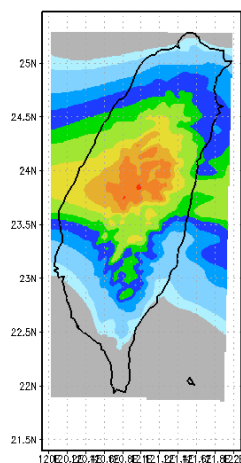
(d) IN*10



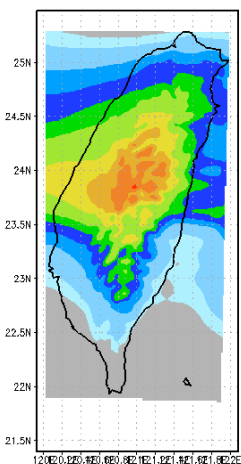
(b) IN*0.1



(e) IN*100



(c) CR



(f)

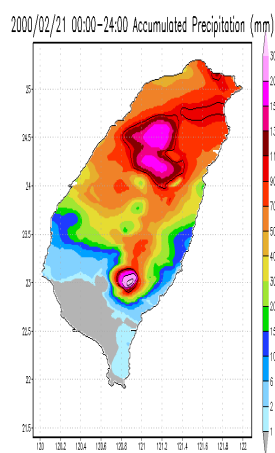
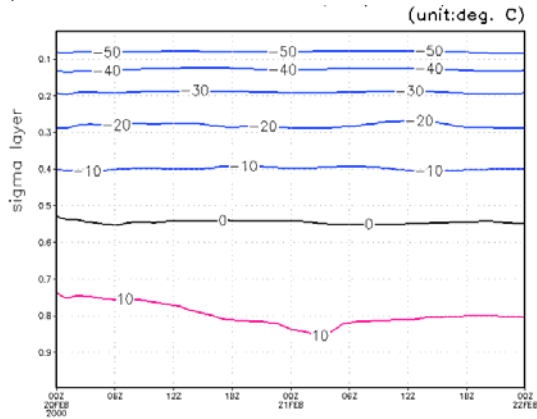
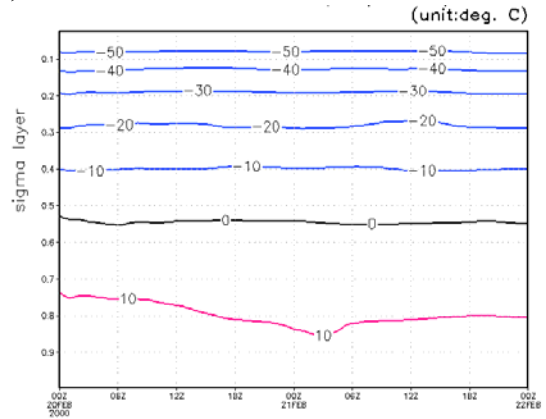


圖 B.1: CCN 濃度固定下之 24 小時累積降雨量模擬結果。模擬 2000 年 2 月 20 日個案第 16 到 40 個小時。(a)IN*0.01;(b)IN*0.1;(c)CR;(d)IN*10;(e)IN*100;(f)中央氣象局地面累積雨量圖 2000 年 2 月 21 日 00:00 至 21 日 24:00。

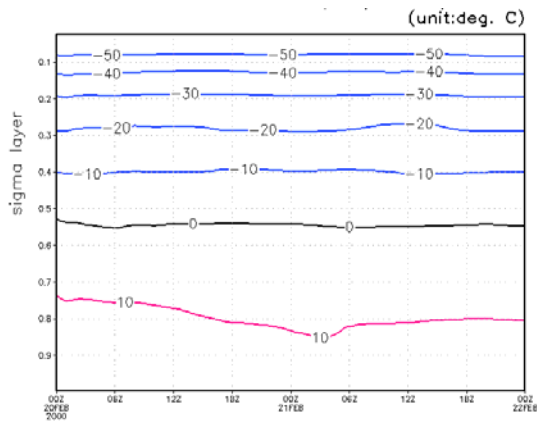
(a) IN = 0



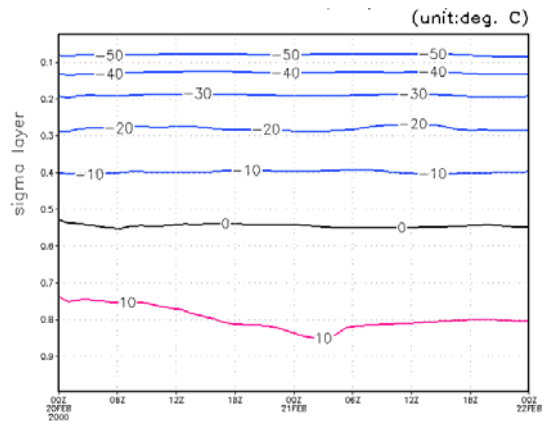
(d) CR



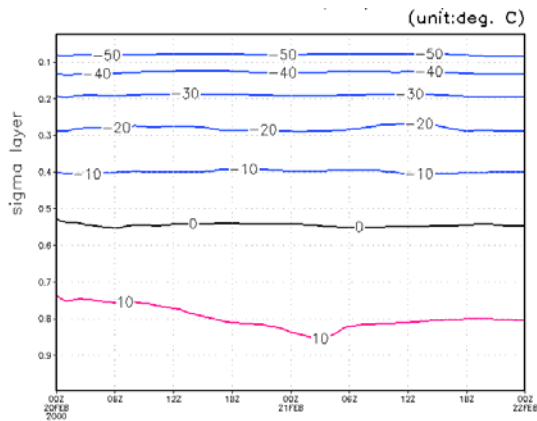
(b) IN*0.01



(e) IN*10



(c) IN*0.1



(f) IN*100

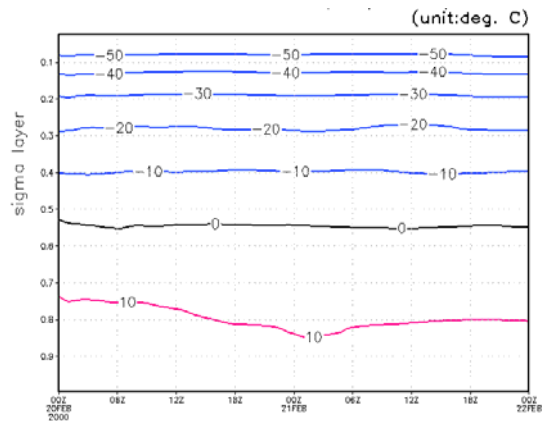
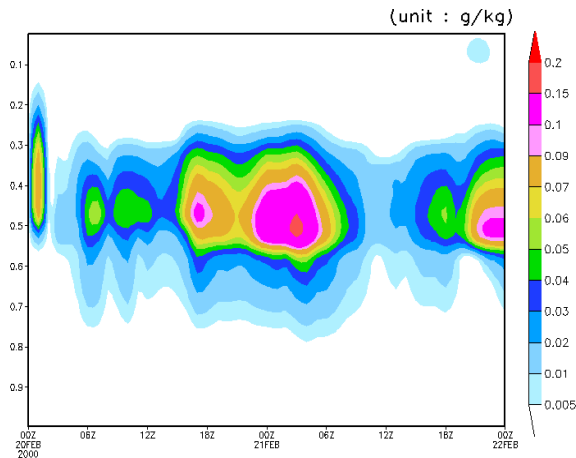
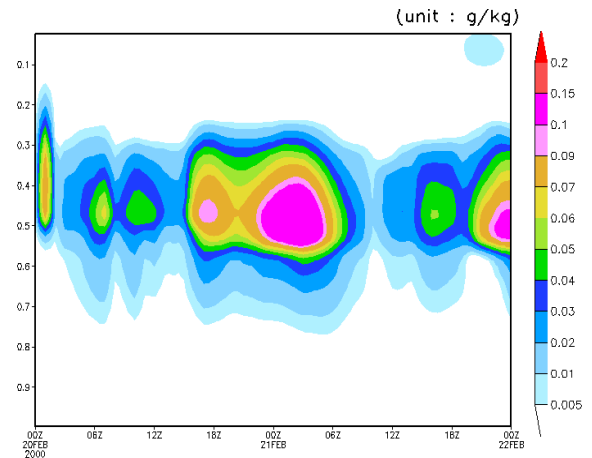


圖 B.2: CCN 濃度固定下，2000 年 2 月 20 日個案平均溫度模擬結果，第四巢區域平均。(a)CCN*0.01;(b)CCN*0.1;(c)CR;(d)CCN*10;(e)CCN*100。

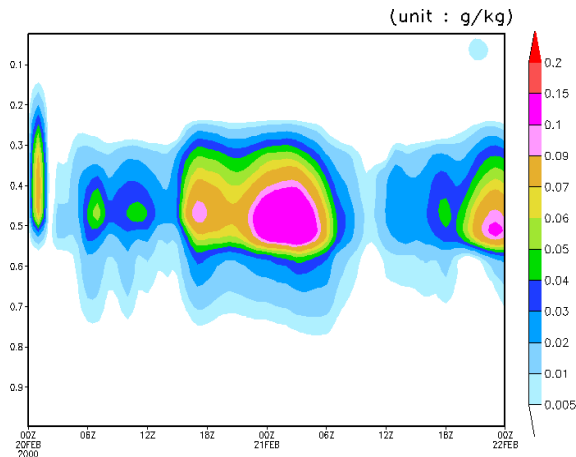
(a) $IN = 0$



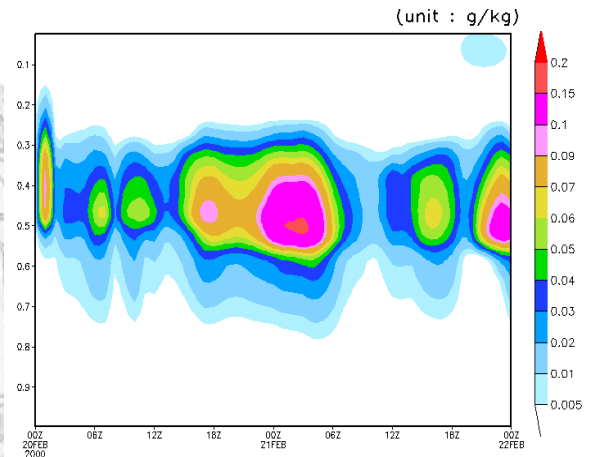
(d) CR



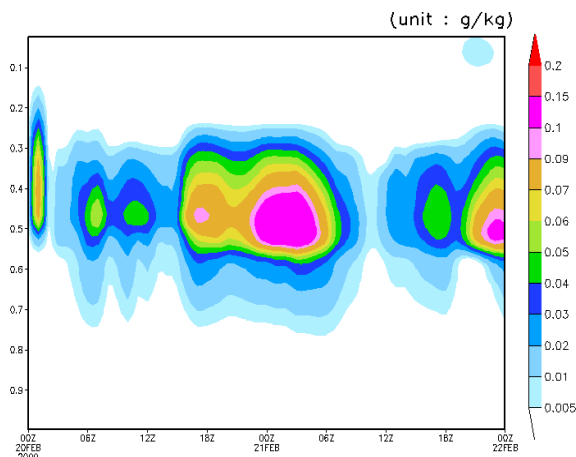
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

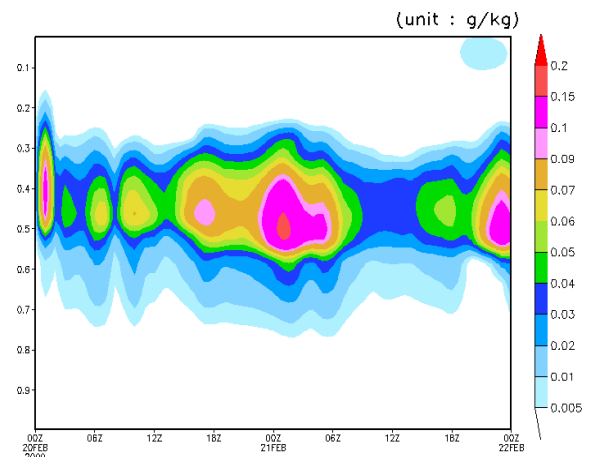
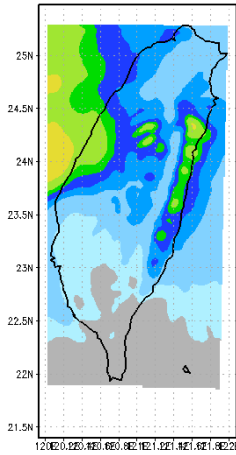


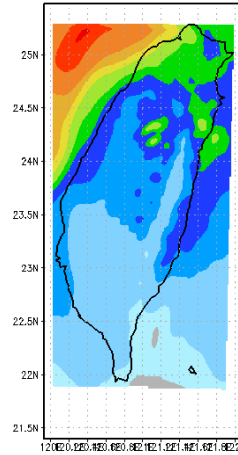
圖 B.3: CCN 濃度固定下，2000 年 2 月 20 日個案之總冰相粒子混合比隨時間、高度變化之模擬結果，第四巢區域平均。(a) $IN=0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d)CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。

附錄 C：實驗三模擬結果補充

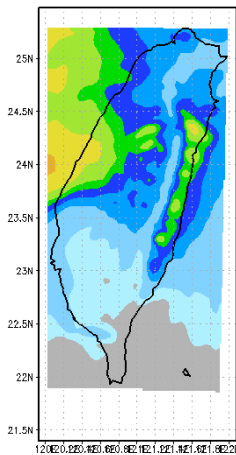
(a) CCN*0.01



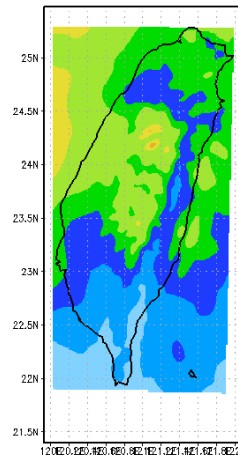
(d) CCN*10



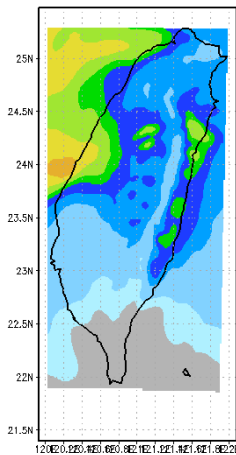
(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR



(f)

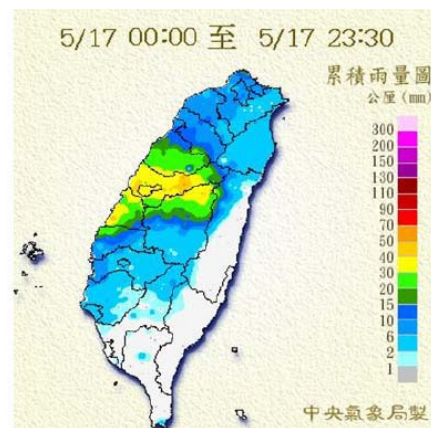
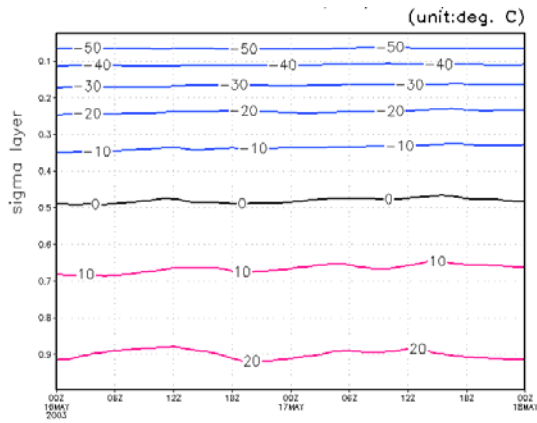
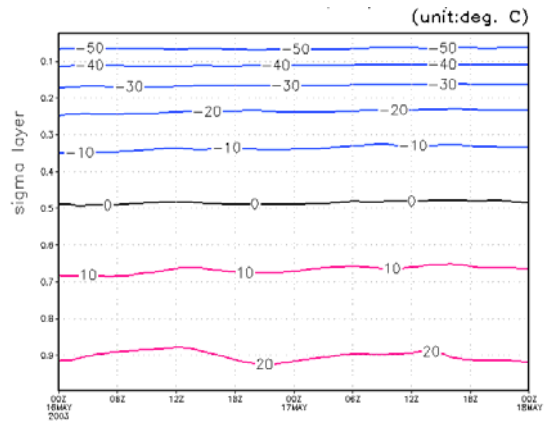


圖 C.1: IN 濃度固定下之 24 小時累積降雨量模擬結果。模擬 2003 年 5 月 16 日個案第 16 到 40 個小時。(a)CCN*0.01;(b)CCN*0.1;(c)CR;(d)CCN*10;(e)CCN*100;(f)中央氣象局地面累積雨量圖 2003 年 5 月 17 日 00:00 至 17 日 23:30。

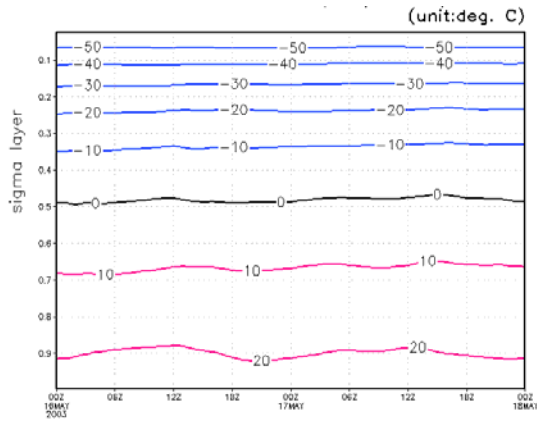
(a) CCN*0.01



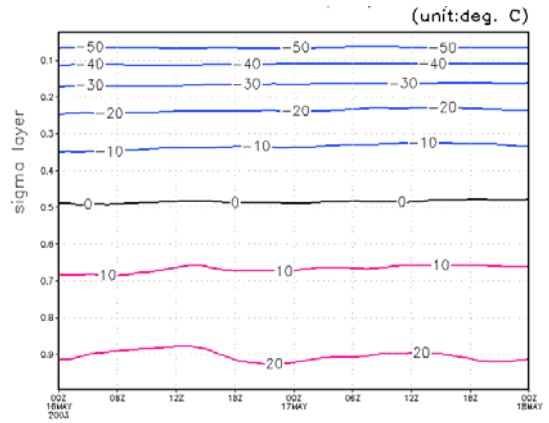
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

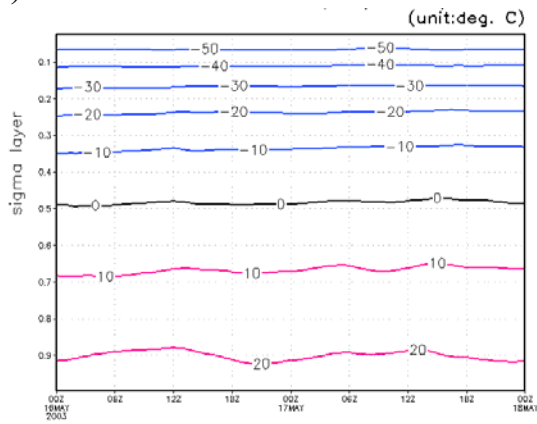
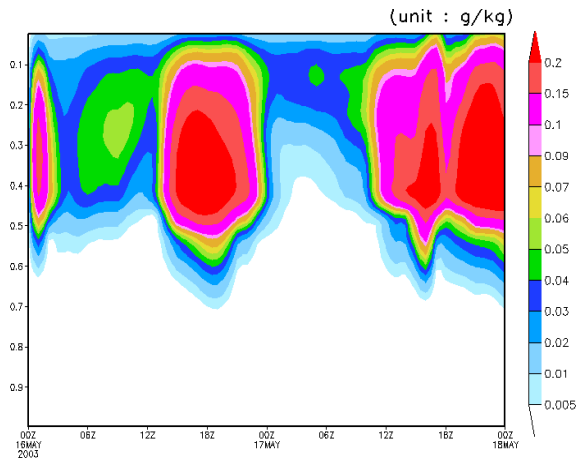
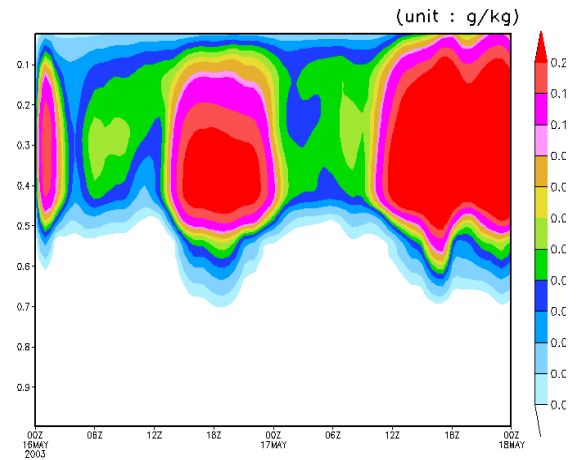


圖 C.2: IN 濃度固定下，2003 年 5 月 16 日個案平均溫度模擬結果，第四巢區域平均。(a)CCN*0.01;(b)CCN*0.1;(c)CR;(d)CCN*10;(e)CCN*100。

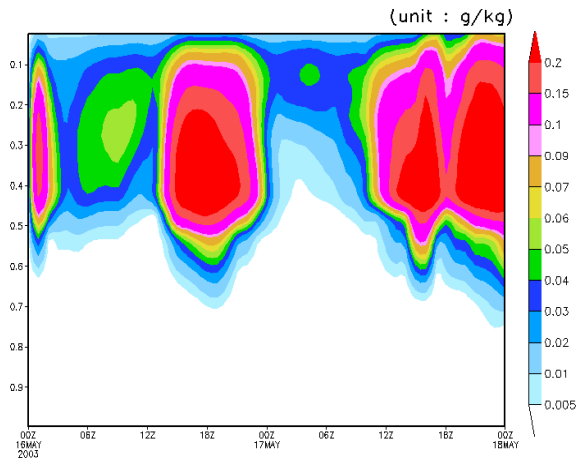
(a) CCN*0.01



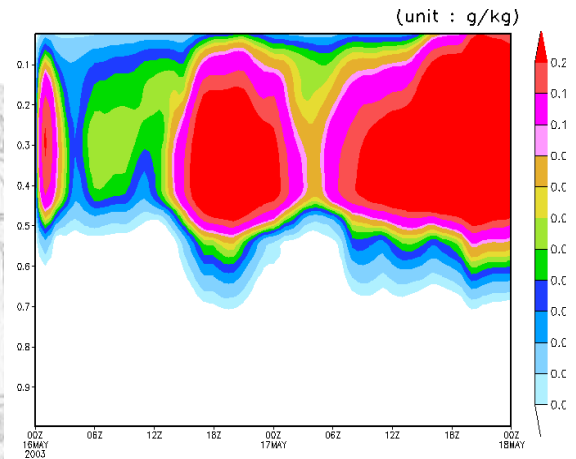
(d) CCN*10



(b) CCN*0.1



(e) CCN*100



(c) CR

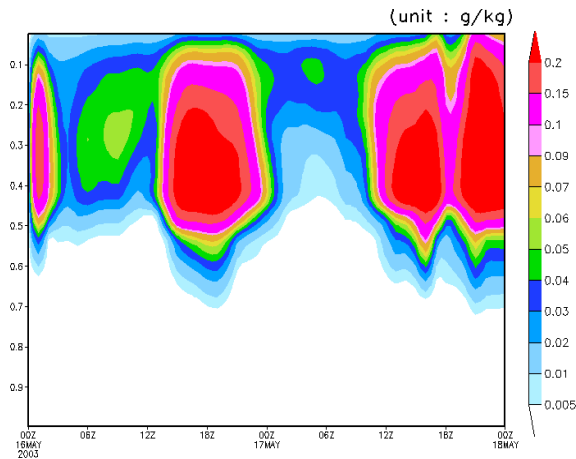
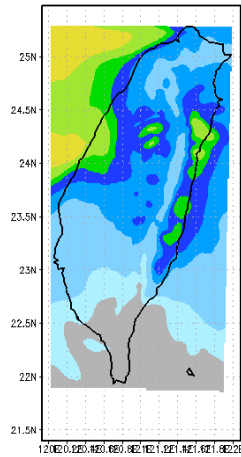


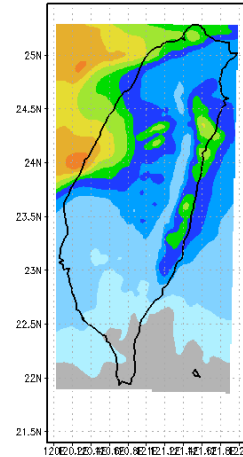
圖 C.3: IN 濃度固定下，2003 年 5 月 16 日個案之總冰相粒子混合比隨時間、高度變化之模擬結果，第四巢區域平均。(a)CCN*0.01; (b)CCN*0.1;(c)CR; (d)CCN*10; (e)CCN*100。

附錄 D：實驗四模擬結果補充

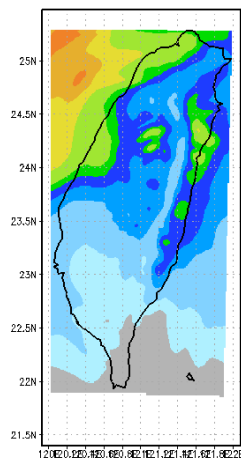
(a) IN*0.01



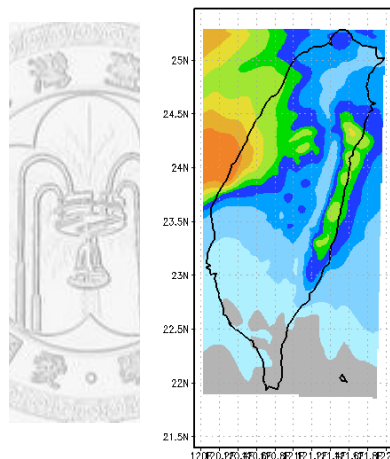
(d) IN*10



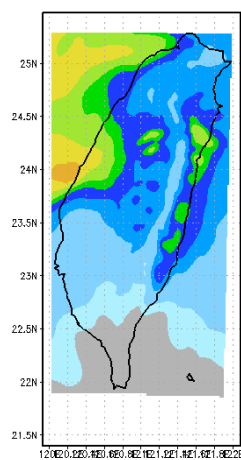
(b) IN*0.1



(e) IN*100



(c) CR



(f)

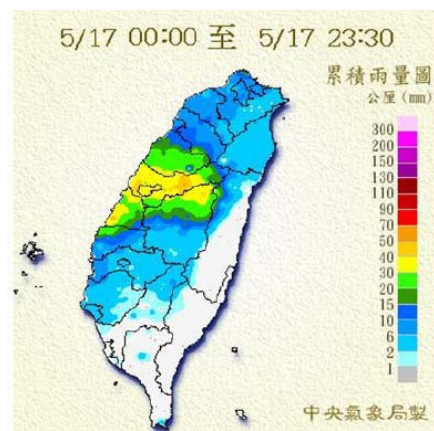
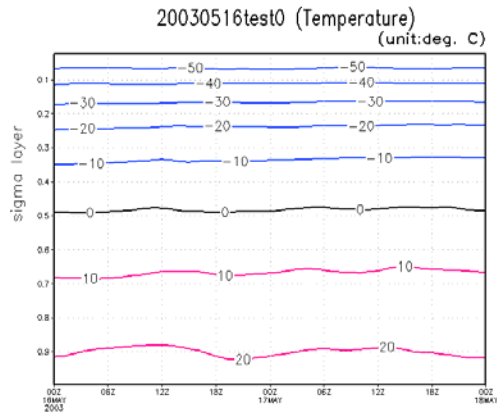
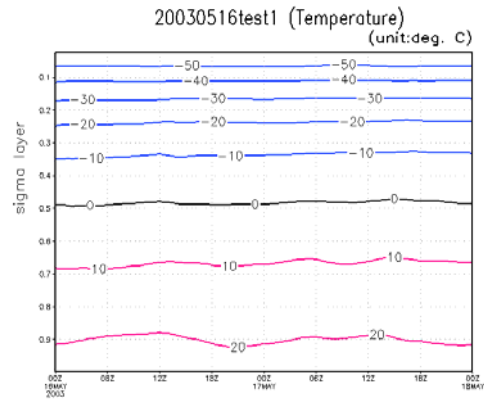


圖 D.1: CCN 濃度固定下之 24 小時累積降雨量模擬結果。模擬 2003 年 5 月 16 日個案第 16 到 40 個小時。(a)IN*0.01;(b)IN*0.1;(c)CR;(d)IN*10;(e)IN*100;(f)中央氣象局地面累積雨量圖 2003 年 5 月 17 日 00:00 至 17 日 23:30。

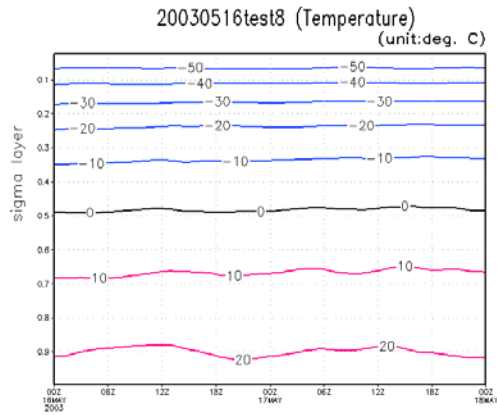
(a) $IN = 0$



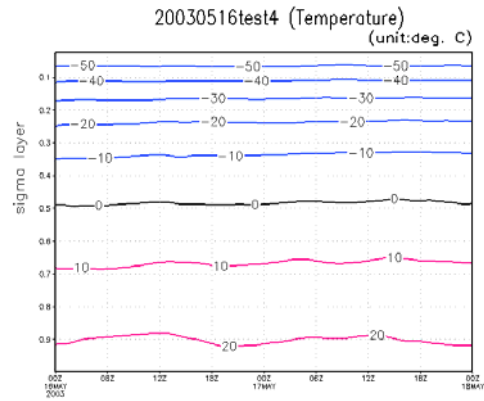
(d) CR



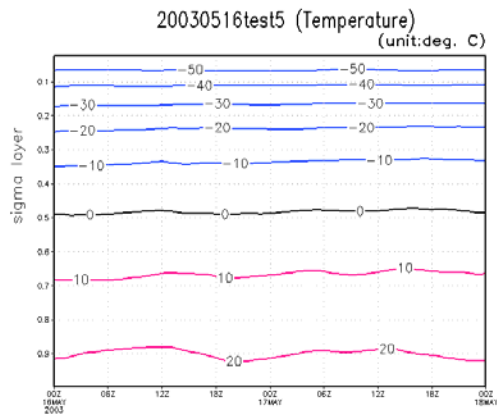
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

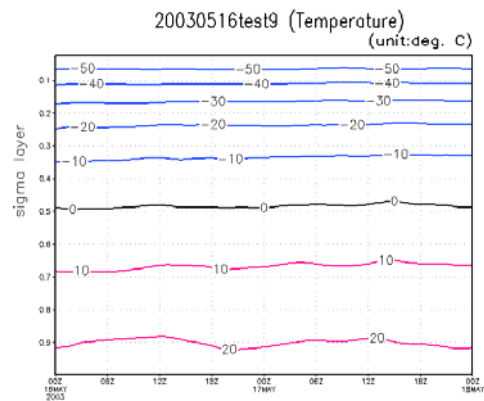
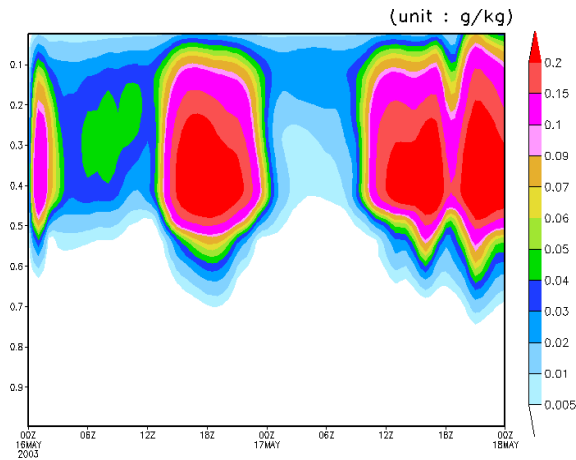
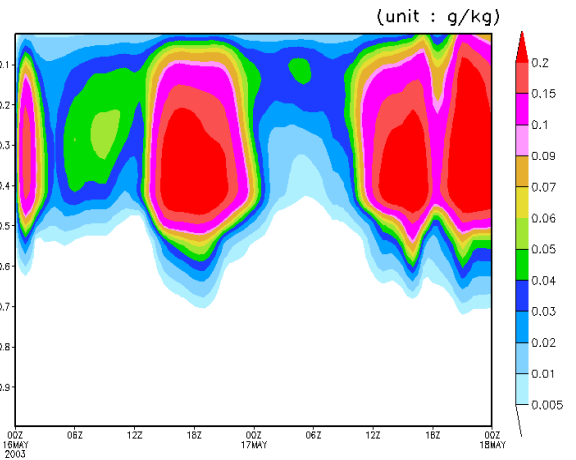


圖 D.2: CCN 濃度固定下，2003 年 5 月 16 日個案平均溫度模擬結果，第四巢區域平均。(a) $CCN*0.01$; (b) $CCN*0.1$; (c) CR; (d) $CCN*10$; (e) $CCN*100$ 。

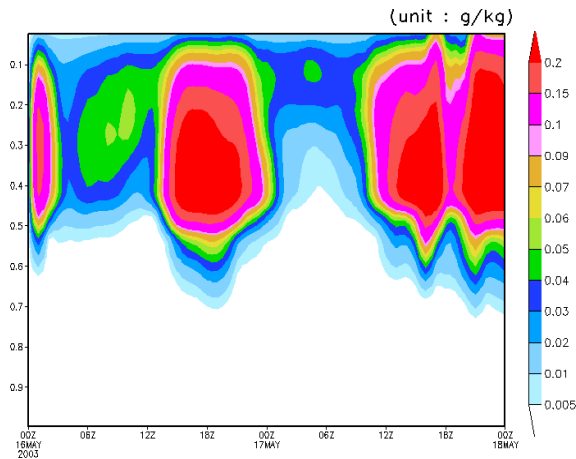
(a) $IN = 0$



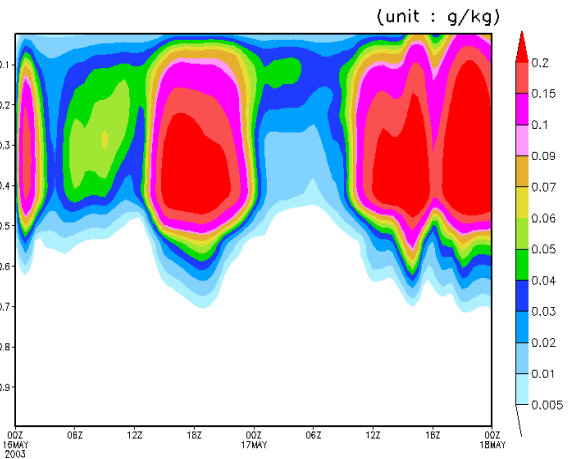
(d) CR



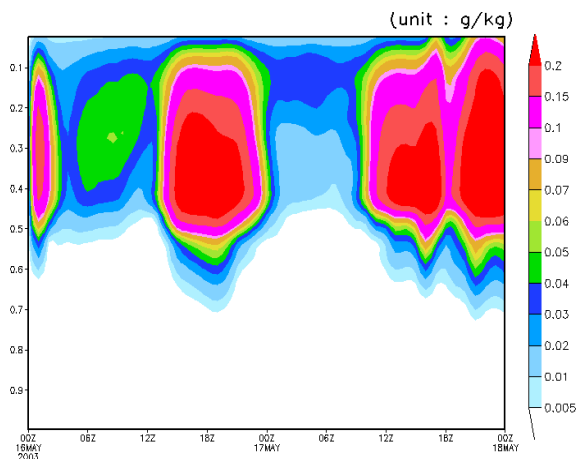
(b) $IN*0.01$



(e) $IN*10$



(c) $IN*0.1$



(f) $IN*100$

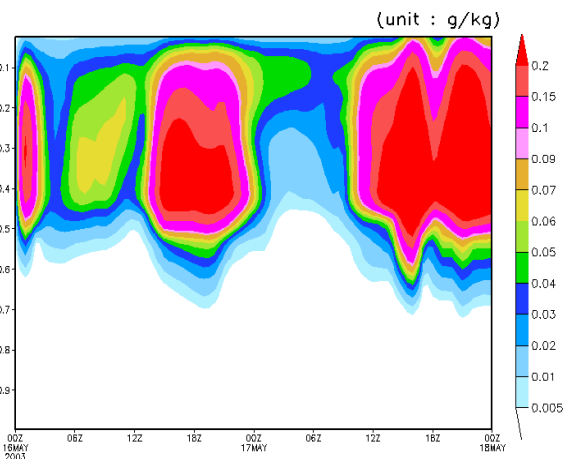


圖 D.3: CCN 濃度固定下，2003 年 5 月 16 日個案之總冰相粒子混合比隨時間、高度變化之模擬結果，第四巢區域平均。(a) $IN = 0$; (b) $IN*0.01$; (c) $IN*0.1$; (d)CR; (e) $IN*10$; (f) $IN*100$ 。