

國立中央大學

大氣物理研究所

碩士論文

同化都卜勒雷達資料改善模式預報之研究

研究生：尤 心 瑜

指導教授：廖 宇 慶

中華民國九十八年七月

中文摘要

本研究目的為探討:同化都卜勒雷達資料及其所反演的大氣狀態變數，於改善劇烈風暴發展預報的可行性。而此研究方法的流程共包含以下三部份：雙都卜勒雷達風場反演、熱動力反演及水汽調整。

研究共設計 6 組實驗，而所有的實驗都是在 OSSE 實驗架構下進行，其測試內容如下:(a)研究方法完整流程的測試、(b)同化次數及同化時間間距的測試、(c)探討探空資料在同化過程中所扮演的角色、(d)測試同化都卜勒雷達資料及反演氣壓場，並於同化過程中利用垂直動量方程式來得到溫度場，看其對模擬結果的影響。

實驗結果顯示，經同化都卜勒雷達觀測資料及其反演的大氣狀態變數後，的確改善初始條件微弱風暴的降水預報結果。於同化次數及同化時間間距的測試，則發現兩者對於改善預報降水的敏感度較低；而在同化過程中，給予探空資料將提升同化結果的準確度，並在此同化之後，再進行一次沒有探空資料的同化，於預報結果有更進一步的改善。而未來最重要的工作目標，則是將本研究方法，應用在真實個案上，期望在實際作業上能改善定量降水的預報能力。

Abstract

The purpose of this study is to explore the feasibility of assimilating atmospheric state variables observed as well as derived from Doppler radar data to improve the prediction of a thunderstorm development. In the methodology, the complete algorithm is composed of three steps, namely (1) wind retrieval, (2) thermodynamic retrieval, and (3) moisture adjustment. The performance of the proposed method is investigated by six experiments, and all of them are conducted under the framework of OSSE (Observation System Simulation Experiment). From these experiments, it is attempted to address the following issues: (1) verification of proposed method (2) the impact of the assimilation frequency and assimilation time interval, (3) influence of assimilating with/without sounding data, and (4) influence of assimilating Doppler radar data and retrieval pressure field only. In (4), the vertical momentum equation is utilized to obtain the absolute potential temperature fields.

The results demonstrate that the accuracy of storm rainfall prediction can be improved after assimilating observed/retrieved atmosphere state variables from Doppler radar data. However, the impact on rainfall prediction from the assimilation frequency and time interval is insignificant. By contrast, the model forecast can be improved substantially if the data from a sounding released within the analysis domain is available. Furthermore, after the first assimilation with sounding, if one conducts a second assimilation even without the information from sounding observations, additional improvements can be achieved. The application of this method to real case study would be a natural extension of this study in the future.

誌謝

以一個有三個孩子的媽媽身份，要能夠在兩年內順利完成研究所的學業，憑心而論，單靠一己之力，實不可能。

首先最要感謝我的指導教授—廖宇慶老師，他願意收非全職生背景的我做為學生，在研究工作上給予充份的指導，充份體諒因家庭因素無法全力配合，並給予適時的幫助，讓我能達到研究與家庭之間的平衡。

感謝陳台琦及林沛練老師，一直以來對我的關心及鼓勵。更要感謝曾忠一老師能夠對我的論文提出許多寶貴的意見，讓我收穫許多，並渴望對研究有更深入的了解。感謝江火明老師，他讓我了解生命的可貴及勇敢面對恐懼的勇氣，活得樂觀精彩，給我許多精神上的鼓勵。

我還要感謝雷達實驗室所有的夥伴們，雅茹、雅茜、雅亭、慧玲、小榆和正紀、紀董、偉裕、少凡、直謙、信豪、聖倫能在我有困難時，伸出援手給予幫助，讓我感到實驗室的溫暖。再來要感謝同班同學們的幫助，尤其是奕如和婷琦，讓經常不在學校的我，仍能熟悉班上事。由於和大家相處，又找回從前就學期間的快樂心情，覺得年輕許多。

另外還要感謝公婆、媽媽、大姑姑、小姑姑長輩們的支持與鼓勵，及大姐在論文校稿上的全力幫助、小妹適時的關心，讓我能兩年內安心完成學業。

最後，我要感謝我的家人，沒有先生庭佑在精神及經濟上的大力支持，我沒有辦法再度回到學校，並完成十年來的夢想，謝謝可愛的三個小寶貝妍蓉、品仲、妍蓓，當每次研究不順遂時，看到他們天真無邪的笑容，又充滿鬥志，謝謝你們。

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖表目錄	vii
第一章 前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 論文架構	4
第二章 研究方法	5
2.1 都卜勒雷達風場合成	5
2.2 熱動力反演方法	7
2.3 熱動力場及水汽調整方法	10
第三章 實驗設計	14

5.2 未來展望	36
參考文獻	38
附表與附圖	42
略語表	79

圖表說明

- 表 2.1 四種「預報」與「事件」發生可能性分類表。
- 表 4.1 實驗三與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時，風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的 SCC 及 RRMSE 值。
- 表 4.2 實驗四與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時，風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的 SCC 及 RRMSE 值。
- 表 4.1 實驗五與「虛擬真實大氣」於同化結束時，風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的 SCC 及 RRMSE 值。
- 表 4.2 實驗六與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時，風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的 SCC 及 RRMSE 值。
- 圖 3.1 各個高度的風場相對於風暴移速的合成探空資料(ms^{-1})，此為 62 個龍捲風暴個案的平均探空結果。
- 圖 3.2 WRF 模式所提供的環境探空資料所繪各變數隨高度的變化圖。由左而右依序是位溫(K)、水汽混合比(g/kg)與水平風向。
- 圖 4.1 「natural run」於第 60 分鐘時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times p_a$ 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg。
- 圖 4.2 實驗 1 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times p_a$ 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg。

- 圖 4.3.a 實驗 1、「natural run」平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。
- 圖 4.3.b 實驗 1 和「natural run」五分鐘累積降雨量相關性、「GS」得分，隨時間變化圖。
- 圖 4.4 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為「natural run」、實驗 1 及實驗 2。
- 圖 4.5 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的雨量場。由上而下依次為「natural run」、實驗 1 及實驗 2。
- 圖 4.6 實驗 2 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100xpa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e) 水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg 。
- 圖 4.7.a 實驗 2、「natural run」平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。
- 圖 4.7.b 實驗 2 和「natural run」五分鐘累積降雨量相關性、「GS」得分，隨時間變化圖。
- 圖 4.8 實驗 3：「同化次數」測試實驗流程圖。實驗 3-1：於模擬時間 01:00 進行 1 次同化的實驗；實驗 3-2：於模擬時間 00:50 及 01:00 時，分別進行 2 次同化的實驗；實驗 3-3：於模式模擬到 00:40、00:50 及 01:00 時同化三次的實驗。
- 圖 4.9 實驗 3-1 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100xpa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2

- 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg。
- 圖 4.10 實驗 3-2 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100xpa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg。
- 圖 4.11 實驗 3-3 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100xpa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg。
- 圖 4.12. a 實驗 3-1、3-2、3-3、「natural run」平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。
- 圖 4.12. b 實驗 3-1、3-2、3-3 分別與「natural run」五分鐘累積降雨量相關性，隨時間變化圖。
- 圖 4.12. c 實驗 3-1、3-2、3-3「GS」得分隨時間變化圖。
- 圖 4.13 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為實驗 3-1、3-2、3-3。
- 圖 4.14 實驗 4：「同化時間間距」測試實驗流程圖。實驗 4-1：於模擬時間 00:50、01:00 進行同化時間間距 10 分鐘的實驗；實驗 4-2：於模擬時間 00:45、01:00 進行同化時間間距 15 分鐘的實驗；實驗 4-3：於模擬時間 00:40、01:00 進行同化時間間距 20 分鐘的實驗。
- 圖 4.15 實驗 4-1 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方

向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times \text{pa}$ 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg。

圖 4.16 實驗 4-2 於同化結束 (01:00)，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂

直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times \text{pa}$ 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg。

圖 4.17 實驗 4-3 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂

直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times \text{pa}$ 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg。

圖 4.18. a 實驗 4-1、4-2、4-3、「natural run」平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。

圖 4.18. b 實驗 4-1、4-2、4-3 分別與「natural run」五分鐘累積降雨量相關性，隨時間變化圖。

圖 4.18. c 實驗 4-1、4-2、4-3「GS」得分隨時間變化圖。

圖 4.19 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為實驗 4-1、4-2、4-3。

圖 4.20 實驗 5：「探空資料影響」測試實驗流程圖。實驗 5-1、5-2、5-3 及 5-4 都於 01:00 時，進行 1 次有探空資料的同化。實驗 5-1 只同化 1 次；實驗 5-2、5-3 分別於 01:10、00:50，進行另 1 次無探空資料的同化；實驗 5-4 則是於 00:50、01:00，進行另 2 次無探空資料的同化。

圖 4.21 「natural run」於第 70 分鐘時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100hPa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg 。

圖 4.22 實驗 5-1 於同化結束(01:00)時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100hPa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg 。

圖 4.23 實驗 5-2 於同化結束(01:10)時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100hPa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg 。

圖 4.24 實驗 5-3 於同化結束(01:00)時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100hPa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg 。

圖 4.25 實驗 5-4 於同化結束(01:10)時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100hPa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg 。

- 圖 4.26. a 實驗 5-1、5-2、5-3、5-4 及「natural run」平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。
- 圖 4.26. b 實驗 5-1、5-2、5-3、5-4 分別與「natural run」五分鐘累積降雨量相關性，隨時間變化圖。
- 圖 4.26. c 實驗 5-1、5-2、5-3、5-4「GS」得分隨時間變化圖。
- 圖 4.27 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為實驗 5-1、5-2、5-3、5-4。
- 圖 4.28 實驗 6-1 於同化結束(01:00)時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100xpa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg 。
- 圖 4.29 實驗 6-2 於同化結束(01:00)時，沿 $x=15\text{Km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100xpa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/Kg 。
- 圖 4.30. a 實驗 6-1、6-2 及「natural run」平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。
- 圖 4.30. b 實驗 6-1、6-2 分別與「natural run」五分鐘累積降雨量相關性，隨時間變化圖。
- 圖 4.30. c 實驗 6-1、6-2「GS」得分隨時間變化圖。
- 圖 4.31 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為實驗 6-1、6-2。

第一章 前言

1.1 研究動機:

Heideman and Fritsch (1988) 針對 1982~1983 年六月至八月期間，探討造成美國地區夏季降水的機制，其研究指出，大約有 80% 的嚴重降水事件是與雷雨風暴的發生有密切關係。且 Lilly (1990) 指出預報雷雨風暴的研究方向，其中包含模式的發展、資料同化及模式初始化等要點，期望氣象學家重視和預報對流系統有關的雲解析尺度數值天氣預報，以降低因嚴重降水所帶來的災害。

在台灣地區，民眾則因為雷雨風暴帶來短時間豪大雨所造成的地區性淹水，而深受水患之苦。故交通部中央氣象局及水利署為了改善洪水及嚴重風暴等監測，積極投入發展短期定量降水預報系統，來加強對強降水事件的預報能力。而「資料同化」是將不同型態、不同時間及地點的觀測資料，加入到預報模式中，其能提供模式預報時，一個精確的大氣狀態描述，又都卜勒雷達能提供時間及空間上高解析度的資料，能夠充份掌握對流尺度天氣現象。所以在 1990 早期，就有許多學者投入同化雷達資料的工作，而雷達資料同化的方法，主要包含有 3DVAR、4DVAR 及 EnKF 等。但都卜勒雷達僅能提供徑向風場及回波場等資訊，若要有更多描述天氣現象的其他氣象參數，則必需藉由各種反演技術來獲得。本研究嘗試同化雷達觀測資料及其所反演的大氣狀態變數(熱力場、水汽場)，來探討其對改善模式預報結果的可行性，尤其是在定量降水預報方面的表現。

1.2 文獻回顧：

關於同化高解析度觀測資料於數值模式中的方法，包含有 3DVAR、4DVAR 及系集卡曼濾波器(Ensemble Kalman Filter；EnKF)等。而四維變分方法(4DVAR)，主要是在伴隨技術(adjoint technique)發展後，被應用在對流尺度的資料同化上，例如 Sun and Crook (1997, 1998, 2001) 將四維變分方法應用在「變分都卜勒雷達分析系統」(VDRAS)中，同化雷達徑向風場及回波場。相較於 4DVAR 需要發展每一預報模式所對應的伴隨模式之困難度，「系集卡曼濾波器」(Ensemble Kalman Filter)則對模式的依賴性較低，且容易做平行化運算。例如，Snyder and Zhang (2003) 首次將 EnKF 應用在對流尺度(含暖雨過程)的都卜勒雷達徑向風資料同化上，以及 Tong and Xue (2005)使用 EnKF 同時同化雷達徑向風以及回波場。而利用三維變分方法(3DVAR)來同化雷達觀測資料，則有 Xiao et al. (2005)等研究，他使用 MM5 3DVAR 系統同化韓國都卜勒雷達所觀測的徑向風場，預報強降水事件。

熱力反演技術的發展：傳統上以 Gal-Chen(1978)(以下簡稱 GC78)利用三維動量方程式，反演熱動力場之技術最被後人廣泛應用。但於 GC78 所反演的熱動力場，主要是得到擾動量與水平平均值的偏差量，故此反演結果只能用來討論天氣系統的水平結構，在垂直結構分析上將會出現錯誤。為了改善這個問題，GC78 提出如果能在每個高度層都有一點壓力與溫度的實際觀測值，即可得到大氣真正的擾動量。而 Roux(1985, 1988)則是利用動量方程式以及簡化的熱動力方程式決定出一組壓力與溫度的擾動場，這個結果和真正的擾動量在整個反演三維空間內只差一個常數值，故只要在反演的區域內有一點壓力與溫度的實際觀測值，則可得到真正的大氣擾動量。Roux and Sun(1990) 則是改進 Roux (1985, 1988)的方法，進一步得到溫度梯度在各方向的分佈情形。

Liou(2001)(以下簡稱 L01)提出一個新的熱力反演技術，即藉由結合完整動量方程式(水平及垂直方向)及熱動力方程式於單一一個價值函數(cost function)中，並從都卜勒雷達觀測風場三維分佈情形，經由三維變分法，同時獲得一組最佳的壓力擾動之梯度和位溫擾動場，相對上述研究僅考慮乾大氣，鍾等人(2002)、Liou et al. (2003)則是將 L01 熱力反演方法進行部份調整，亦即考量濕大氣過程，且將此反演方法應用在 1987 年 5 月 17 日 0043(LST)TAMEX 之 IOP#2 颶線個案，來分析探討颶線的熱動力結構，並驗證了此方法在實際應用上的可行性。

能否藉由同化雷達反演的氣象場來初始化數值模式，並進一步改善模式預報結果的問題，是氣象學家相當關注的。故 Lin et al. (1993) 首先針對 1977 年 5 月 20 日發生在 Del City 的龍捲風暴(tornadic storm)個案，探討利用雷達所反演的大氣狀態變數(其中包含風場、水汽場、溫度場及氣壓場)初始化數值模式的可行性，研究得到成功的預報結果。另外，Crook (1994a)在利用雷達反演風場初始化的數值模擬研究中，使用陣風鋒面的模擬資料來檢驗雷達反演風場初始化的技術，並於 Crook and Tuttle(1994b)將其應用在 1991~92 年夏季發生於科羅拉多東北方的三個陣風鋒面個案，並對其預報結果做驗證分析。其結果顯示，加入雷達觀測及其反演之資訊後，數值模式較持續法在地面風場、地面輻合場及地面溫度場上的預報分別改善了 30%、25%及 28%。另外，在 Weygandt et al. (2002a, b)的兩部份研究中仍是處理和 Lin et al. (1993)類似的問題，只是在風場反演部份採用 Shapiro et al. (1995)所提出的 SDVR 方法得到風場資訊，其研究中並詳述如何獲得 q_v 、 q_c 、 q_r 等水汽場。

1.3 論文架構:

本論文共分為五章：第二章是研究方法介紹，將說明雙都卜勒風場合成技術的原理及以 GC78 為基礎所發展的熱動力反演方法。第二部份則呈現如何獲得完整熱動力場並藉由水汽調整過程來彌補都卜勒雷達無法提供水汽資訊的不足。

第三章為 WRF 模式介紹與設定，並敘述「觀測系統模擬實驗」的架構及流程。最後提出驗證同化結果方法，有空間相關係數(SCC)、相對均方根誤差(RRMSE)等。另外，在定量降水檢驗方法，則有 Gilbert Skill Score (GS) 與相關係數(CC)等。

第四章介紹依不同目的所設計的實驗及其結果討論。第五章為本研的總結及對未來展望。

第二章 研究方法

2.1 都卜勒雷達風場合成：

由於都卜勒雷達僅能提供回波場及徑向風場等資訊，無法得知風場的三維分佈情形，故於本研究中採用 Liou(2009)所提出的雙都卜勒雷達風場合成技術來解決此問題。而此方法優於傳統風場反演技術主要有以下三點：(1)於沿著雷達基線及其附近的風場仍能藉由此新方法獲得。(2)不再需要提供計算垂直風場時所需要的積分項、底層的邊界條件。(3)此方法在處理多都卜勒雷達風場合成時仍是相當容易。此法主要是藉由變分的概念以極小化下列之價值函數，表示為：

$$J = \sum_{M=1}^5 J_M \quad (2.1)$$

上式中包含兩個時間，有 N 座雷達可進行合成，於本研究中則假設有兩座雷達進行風場合成。價值函數中共有五項約束條件，各項代表意義解釋如下：

$$J_1 = \sum_{t=1}^2 \sum_{xyz} \sum_{i=1}^N \alpha_1 (T_{1,i,t})^2 \quad (2.2)$$

$$T_{1,i,t} = (V_r)_{i,t} - \frac{(x - P_x^i)}{r_i} u_t - \frac{(y - P_y^i)}{r_i} v_t - \frac{(z - P_z^i)}{r_i} (w_t + W_{T,t}) \quad (2.3)$$

$$r_i = \sqrt{(x - P_x^i)^2 + (y - P_y^i)^2 + (z - P_z^i)^2} \quad (2.4)$$

第一項如公式(2.2)，代表合成的風場(u_t, v_t, w_t)在兩個時間，沿每座雷達徑向方向的投影，需大略等於該雷達於該時間觀測的徑向風($(V_r)_{i,t}$)。

(P_x^i, P_y^i, P_z^i) 代表第 i 個雷達的位置； r_i 為格點到第 i 個雷達之間的距離； $W_{T,t}$ 為終端落速，可利用雷達回波估計，而權重係數 α_1 在有雷達資料的格點上假設為 1。

$$J_2 = \sum_{t=1}^2 \sum_{xyz} \alpha_2 (\vec{V}_t - \vec{V}_{B,t})^2 \quad (2.5)$$

第二項代表背景場項如(2.5)式，是用來處理當模式的格點沒有被任何一座雷達的資料覆蓋時，這些點的風場需由背景場的值來填補。在本研究中第一次同化時，是使用模式所提供的探空資料，而第二次以後的同化則是以模式預報的風場來提供背景場資料。

$$J_3 = \sum_{t=1}^2 \sum_{xyz} \alpha_3 \left[\frac{\partial(\rho_0 u_t)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_0 v_t)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_0 w_t)}{\partial z} \right]^2 \quad (2.6)$$

第三項定義如(2.6)式，代表合成的風場要大略滿足非彈性連續方程。其中 ρ_0 是空氣密度，僅為高度的函數。

$$J_4 = \sum_{xyz} \alpha_4 \left\{ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \overline{\left[u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} + w \frac{\partial \xi}{\partial z} + (\xi + f) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]} \right\}^2 \quad (2.7)$$

$$\xi = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.8)$$

在忽略混合項及斜壓項的作用下，第四項(2.7)式代表合成的風場要滿足垂直渦度方程。上標橫線代表於兩個時間間隔內的時間平均。

$$J_5 = \sum_{t=1}^2 \sum_{xyz} \alpha_5 \left[\nabla^2 (u_t + v_t + w_t) \right]^2 \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

第五項為平滑項。其中第二項到第五項的權重係數，是經由一系列的測試過程而決定，其值 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 分別為 10^{-2} 、 4×10^7 、 4×10^{11} 及 10^9 。上式涵蓋的區域與模式範圍相等，以方便同化的進行。藉由極小化以上的價值函數，則可以得到風場的三維分佈情形。

2.2 熱動力反演方法：

在熱動力反演技術的使用上，本研究乃以 GC78 的方法為基礎，GC78 主要是在解一個與壓力擾動有關的包桑方程式(Poisson equation)，使用此方法的優點在於其壓力的邊界條件並不是人工假設，而是從雷達所觀測的風場計算獲得，故不會因為不合理的邊界條件，增加反演結果之誤差。而不同於 GC78，本研究另增添具有水相變化大氣的暖雨過程來進行熱動力反演。其概念如下：

在笛卡爾固定座標下，動量方程式可以表示成：

$$\frac{1}{\theta_{v0}} \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla u - fv + turb(u) \right] = -\frac{\partial \pi'}{\partial x} \equiv -F \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{\theta_{v0}} \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla v + fu + turb(v) \right] = -\frac{\partial \pi'}{\partial y} \equiv -G \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{\theta_{v0}} \left[\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w + turb(w) + gq_r \right] = -\frac{\partial \pi'}{\partial z} + g \frac{\theta'_c}{\theta_0 \theta_{v0}} \equiv -H \quad (2.13)$$

方程式中，上標一撇代表相對於基本態(basic state)的擾動量，下標 0 則代表基本態。其中 θ_{v0} 為虛位溫(virtual potential temperature)的基本

態，定義如下：

$$\theta_{v0} = \theta_0(1 + 0.61q_{v0}) \quad (2.14)$$

\vec{V} 代表 u 、 v 、 w 三個分量的風， f 為科氏參數， g 則是重力加速度， q_r 是雨水含量混合比(rain water mixing ratio)。 $turb(\)$ 表示次網格的亂流項，可以利用參數化方式運算。 π 為標準化氣壓，即所謂的 Exner function，它的定義為：

$$\pi = C_p \left(\frac{p}{p_{00}} \right)^{R/c_p} \quad (2.15)$$

其中 p 是氣壓， $p_{00} = 1000hpa$ ， R 是氣體常數， C_p 是等壓比熱 (specific heat capacity)。 θ'_c (virtual cloud temperature perturbation) 為虛雲位溫擾動量，其已納入了水汽及雲水的貢獻，定義如下：

$$\theta'_c = \theta' + (0.61q'_v - q'_c)\theta_0 \quad (2.16)$$

其中 θ 是位溫(potential temperature)， q'_v 為水氣擾動含量之混合比， q'_c 是雲水含量混合比。 θ'_v 則為虛位溫定義如下：

$$\theta'_v = \theta(1 + 0.61q_v) \quad (2.17)$$

另外，雨水含量混合比 q_r ，可由雷達回波估計之，亦即假設雨滴大小為 Marshall-Palmer 的型態分佈下，利用 Z - q_r 關係式估計：

$$\frac{35}{2} \log M + 43.1 = Z(dBZ) \quad (2.18)$$

其中 $M = \rho \times q_r$ (單位： kgm^{-3})， ρ 是空氣密度。

於本研究利用都卜勒雷達觀測之風場，進行雙雷達合成而獲得風場的三維分佈情形後，則可求得(2.11)、(2.12)、(2.13)三式等號左邊各項。

另結合水平動量方程式(2.11)及(2.12)，則本反演技術的價值函數(cost function)為：

$$J = \iint [p_1^2 + p_2^2] dx dy \quad (2.19)$$

其中，

$$p_1 = \left(\frac{\partial \pi'}{\partial x} - F \right), \quad p_2 = \left(\frac{\partial \pi'}{\partial y} - G \right) \quad (2.20)$$

此價值函數於變分的過程中，讓每一項趨近於零，使得價值函數得以達到一個極小值的狀態。而 P_1 、 P_2 趨近於零，表示反演所得到的壓力擾動量能夠滿足水平動量方程式。極小化此價值函數後，得下列公式：

$$\frac{\partial^2 \pi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \pi'}{\partial y^2} = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \pi'}{\partial x} = F \quad \frac{\partial \pi'}{\partial y} = G \quad (2.22)$$

公式(2.21)為 Poisson 方程型態所表示的氣壓方程，以及如公式(2.22)所示的 Neumann 邊界條件，其適用於 $X = X_L$ ， $X = X_R$ 及 $Y = Y_L$ ， $Y = Y_R$ 的邊界上。（ X_L ， X_R ， Y_L ， Y_R 分別為 X、Y 方向的左右邊界）。由於使用 Neumann 邊界條件，其所得到的解並不是唯一的，故由公式(2.21)及(2.22)可解出某一層的 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ ，亦即壓力擾動場相對於其水平平均的偏差值，此時，才是得到唯一的解。將每一層的 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 算出來後，再應用垂直動量方程式(2.13)，則可求出 $\theta'_c - \langle \theta'_c \rangle$ ，即虛雲位溫擾動量相對於其水平平均的偏差量。如下所示：

$$-\frac{\partial(\pi' - \langle \pi' \rangle)}{\partial z} + g \frac{(\theta'_c - \langle \theta'_c \rangle)}{\theta_0 \theta_{v0}} \equiv -(H - \langle H \rangle) \quad (2.23)$$

2.3 熱動力場及水汽調整方法：

由於都卜勒雷達沒有辦法得到水汽的資訊，故在本研究中使用新發展的水汽調整方法，並假設水汽不會過飽和，只會正好達到飽和，此時只要判斷哪個格點已經飽和了，就可以進行水汽混合比的修正。本研究中乃以高度大於舉升凝結層、有雷達回波且垂直速度絕對值大於 3ms^{-1} 的格點視為達飽和狀態。調整水汽場步驟如下：

1) 因為在調整水汽場的過程中，需要溫度場及氣壓場的資訊，但根據以上所介紹的熱動力反演技術，主要是得到氣壓擾動量、溫度擾動量相對於其水平平均值的偏差量，即 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 與 $\theta_c' - \langle \theta_c' \rangle$ ，其中每一層的 $\langle \pi' \rangle$ 、 $\langle \theta_c' \rangle$ 是未知的待定常數，故此反演結果只能用來討論天氣系統的水平結構，在垂直結構分析上將會出現錯誤。如果能在每個高度層都有一點壓力與溫度的實際觀測值，便可得到大氣真正的擾動量在三度空間的分布情形。本研究使用兩種方法來解決，其中一種為使用探空資料，其二則使用模式預報結果來計算 $\langle \pi' \rangle$ 、 $\langle \theta_c' \rangle$ 。首先以探空資料解決 $\langle \pi' \rangle$ 、 $\langle \theta_c' \rangle$ 等未知待定常數為例，在本研究中，假設在天氣系統內某一點，有一組探空資料可對每一層的溫度及壓力有實地觀測結果，進而得到氣壓及溫度擾動量。

即藉由熱動力反演過程，可得 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 、 $\theta_c' - \langle \theta_c' \rangle$ ，經由轉換後，公式如下：

$$\pi' - \langle \pi' \rangle \approx \frac{R}{p_0} \left(\frac{p_0}{p_{00}} \right)^{R/c_p} (p' - \langle p' \rangle) \quad (2.24)$$

$$\theta_c' - \langle \theta_c' \rangle = \theta' - \langle \theta' \rangle + [0.61(q_v' - \langle q_v' \rangle) - (q_c - \langle q_c \rangle)] \theta_0 \quad (2.25)$$

$$\theta' - \langle \theta' \rangle = \left(\frac{p_{00}}{p} \right)^k (T' - \langle T' \rangle) - k \frac{\theta_0}{p_0} (p' - \langle p' \rangle) \quad (2.26)$$

於水汽調整的一開始，令擾動水汽混合比(q_v')及擾動雲水混合比(q_c)為零，便可得到每一高度層 $p' - \langle p' \rangle$ 、 $T' - \langle T' \rangle$ 的結果，其中(2.26)的 $k = R/c_p$ 。假設此時，有一組通過模擬區域內某一地點的探空資料，則可以得到通過此地點各個高度層的氣壓及溫度場(p ， T)。再將此氣壓場及溫度場扣除大氣基本場(P_0 ， T_0)後，得到通過此地點每一高度層的氣壓及溫度擾動量(p' ， T')。另外，因此點上每一高度層的 $p' - \langle p' \rangle$ 、 $T' - \langle T' \rangle$ 已知，將以上得到的(p' ， T')代入後，便可獲得每一層的 $\langle p' \rangle$ 、 $\langle T' \rangle$ 。而在每點的 $p' - \langle p' \rangle$ 、 $T' - \langle T' \rangle$ 已知下，則可求得各個高度層上每一點的 p' 、 T' ，加上大氣基本場(P_0 ， T_0)後，最後得到 p 、 T 的三維分布情形。在同化過程中無探空資料提供的情形下，則採用模式預報到同化當時的結果去計算氣壓擾動及溫度擾動水平平均場 $\langle \pi' \rangle$ 、 $\langle \theta_c' \rangle$ 。

2)利用熱力反演之壓力場資訊，可計算出地表的露點溫度，其公式如(2.27)，其中 $A = 2.533 \times 10^8 \text{ kPa}$ 、 $B = 5.417 \times 10^3 \text{ K}$ 、 $\varepsilon = 0.622$ 。

$$T_d = \frac{B}{\ln\left(\frac{A\varepsilon}{(q_{v0}P)_{sfc}}\right)} \quad (2.27)$$

由地表溫度與露點溫度之差值可估計舉升凝結層(Lifting Condensation Layer; LCL)的高度(Rogers and Yau, 1989)H，定義如下：

$$H(\text{km}) \approx \left(\frac{T - T_d}{8}\right) \quad (2.28)$$

其中溫度 T 為步驟 1 所得到的結果。當舉升凝結高度已知後，加上雷達回波及垂直速度的判別，可確定模擬區域內哪些格點已達到飽和標準。

3)利用溫度場 T 已知，可同時計算飽合水汽壓 e_s (2.29)，及飽合水汽

混合比(2.30)

$$e_s(T) = Ae^{-B/T} \quad (2.29)$$

$$q_{vs} = \varepsilon \frac{e_s}{p} \quad (2.30)$$

4) 對於達飽和的格點，計算其調整後的水汽混合比擾動量 q'_v (2.31)

$$q'_v = q_{vs} - q_{v0} \quad (2.31)$$

其中 q_{v0} 為大氣基本水汽混合比。另外，在水汽調整的過程中，其溫度場也跟著一起做調整。

5) 將步驟 4 調整後的水汽混合比擾動量 q'_v ，代入步驟 1 的公式 (2.25)，此時 q'_v 不再為零，而擾動雲水混合比 (q_c) 則是使用模式預報的結果，最後得到一組新的溫度場。接下來將此溫度場代入步驟 2，可得到一組新的舉升凝結高度，即可重新進行判別網格點是否達飽和的動作。之後，繼續進行步驟 3、4，經由不斷重覆步驟 1~4 的疊代過程，使水汽混合比及溫度場達到我們所設定的收斂門檻值，即完成水汽調整動作，並且得到最佳的水汽混合比分布情形。

另外一提的是，在調整水汽過程中，於第一次同化時都是假設 $q'_v = 0$ 為初始猜測值，亦即不滿足飽合條件的網格點，其 $q'_v = 0$ ，表示這些點的水汽場僅為大氣基本水汽場 q_{v0} ；而在第一次同化以後再做的剩餘同化過程，則是採用模式預報的水汽混合比擾動量， $q'_v = q_v - q_{v0}$ (其中 q_v 為模式預報至同化當時的水汽混合比) 來做為初始猜測值，則此時不滿足飽合條件的網格點不再是只有大氣的基本水汽場資訊，而是加入了預報的結果，其餘達飽和的各點，則使用以上所介紹的概念去進行調整。

經由以上所介紹的各種方法，該天氣系統加入雷達所觀測的回波場、

反演的三維風場及反演的熱力場等資訊，其運動場、熱力場(含溫度與壓力)、以及微物理場均已確定，可繼續往下預報，或進行下一次同化。

第三章 實驗設計

3.1 數值模式介紹：

本研究所使用的數值模式為 WRF v2.2.2 版本，此模式是由美國國家大氣研究中心（National Center for Atmospheric Research）所研發的最新一代數值天氣預報系統，稱為天氣研究與預報模式(Weather Research and Forecasting Model; 以下簡稱 WRF)。

3.1.1 WRF 模式設定

WRF 模式適用於空間尺度為數十公尺到數千公尺的天氣系統，在本研究中，模式空間水平解析度為 2 公里，採單層網格；垂直解析度為 0.5 公里，共 40 層。模式設定網格個數為 $41 \times 41 \times 40$ ，其包含的空間範圍為 $80 \times 80 \times 20 \text{ Km}^3$ ，積分時間間距為 10 秒。

而在 WRF 模式的微物理法，於本研究則是選用 Kessler Scheme，此法為 Kessler (1969) 所提出來的一個簡單暖雨過程微物理法，它主要包含了水氣、雲水及雨水的變化，亦即雨水的形成、掉落及蒸發和因凝結而產生的雲水，而不包含冰相及混相的過程。

WRF 模式的積雲參數法則有三種，其主要是在處理次網格尺度的對流效應。但於本研究，其水平解析度為 2 公里，已足夠解析對流尺度的天氣現象，故沒有選用任何的積雲參數法。而在邊界條件方面，則採用開放側邊界條件。

於本研究中，選擇 3D quarter-circle shear supercell (Weisman and

Rotunno, 2000) 理想個案來探討。而此個案為根據美國中西部所發生的雷雨暴特性及雷雨生成過程中，其大環境底層風場有隨高度旋轉 1/4 圈之特徵所設計，如圖(3.1)所示。個案描述如下：於模式模擬開始，模擬區域內，位置(x, y, z)=(14, 40, 1.5)公里處，置入一個中心擾動溫度為 3K(即較環境溫度高 3K)，且其溫度隨著遠離中心的距離逐漸減弱，到距離中心 10km 的位置溫度擾動量為零、結構對稱的熱胞。接下來，以此熱胞及 WRF 模式所提供的一組「虛擬探空資料」為初始場向前模擬。即以此「虛擬探空資料」為大氣環境的基本場，其水平風向、位溫度場及水汽混合比場的垂直分佈情形如圖(3.2)。由熱動力場的垂直分佈顯示，此為一個具有對流可用位能(CAPE)2200 Jkg^{-1} 的中等不穩定大氣環境，其舉升凝結高度(LCL)約為 1 公里。隨著時間的積分，此熱胞會逐漸發展成一個孤立的雷雨暴，再經過一段時間後，此雷暴會分裂為一個向右走另一個向左走的一對雷雨暴，且向右走的雷暴強度會比向左走的雷暴強度要來得強，於積分三小時後，兩個雷暴都消散了。

3.1.2 OSSE 實驗概念

觀測系統模擬實驗(Observation System Simulation Experiments)簡稱OSSE，是一種由虛擬氣象觀測資料取代真實觀測資料的觀測系統實驗型態，亦即以高解析度的數值模式經長時間預報後，建立一虛擬的真實大氣狀況(natural run)與觀測資料。而OSSE實驗最主要的目的在於評估：同化來自所設計觀測系統的觀測資料對於數值天氣預報可能產生的影響。於本研究中，乃利用此概念並配合實驗目的修改同化策略，重新預報後，將結果與虛擬真實大氣做比較，以了解各實驗方法對預報改善的程度。

3.2 實驗流程介紹：

資料同化在提供模式預報時，準確的大氣狀態描述上扮演了相當重要的角色，而其主要的目的是將觀測資料，加到預報模式中，修正預報場，以降低誤差，提高預報的精確度。於本研究中，使用觀測系統模擬實驗的流程大致分為三大步驟。

1) 首先利用 WRF 模式所提供的理想個案，建立一個以一組「虛擬探空資料」及中心擾動溫度 3k 的熱胞為初始場向前模擬三小時所得到的「虛擬真實大氣」，並將描述此虛擬大氣的所有氣象場視為正確結果。而為了模擬是由雷達此遙測儀器所獲得實際觀測結果，故需將「虛擬真實大氣」的三維風場資料，轉換成是由兩座位於模擬區域外的「虛擬雷達」所觀測到之徑向風資料，其中「雷達一」、「雷達二」的位置分別位於 $(x, y, z) = (100, 0, 0)$ 公里及 $(x, y, z) = (100, 80, 0)$ 公里處。

又得到的徑向風場是為了接下來的雙雷達風場合成所用，故需要有兩個時間由此兩座雷達所觀測的徑向風。於本實驗中，所選取的風場時間間距為 3 分鐘，故其步驟如下：假設以要得到時間為第 30 分鐘(30:00)時的合成風場為例，首先需將「虛擬真實大氣」中，時間為第 28 分 30 秒(28:30) 及第 31 分 30 秒(31:30)的三維風場取出，投射到兩座虛擬雷達的徑向方向，便可得到兩座雷達在兩個時間所觀測的徑向風。即利用以下的公式：

$$V_r = \frac{x - x_r}{r} u + \frac{y - y_r}{r} v + \frac{z - z_r}{r} (w - v_t) \quad (3.1)$$

其中， u 、 v 、 w 為三維風場， V_r 為徑向風， x 、 y 、 z 為空間中任一格點的位置， x_r 、 y_r 、 z_r 為雷達位置， r 則為雷達到空間中該格點的距離。 v_t 為終端落速(單位： ms^{-1})，當回波場 Z (單位：dbz) 小於零時，令 $v_t = 0$ ；而在其餘情形下 v_t 則為 $v_t = -3.088 \times (Z)^{0.0957}$ 。另外，由虛擬雷達觀測到

的回波場，則是利用「虛擬真實大氣」的雨水混合比 q_r ，即公式(2.18)來計算獲得。以上所得到的虛擬觀測資料，並沒有考慮任何隨機誤差，亦即假設觀測與真實結果沒有差異，且使模擬區域內，各網格點都可以讓此兩座「虛擬雷達」資料所覆蓋。

2)當得到兩座「虛擬雷達」在兩個時間所觀測的徑向風場及回波場資訊後，第二個步驟為利用第二章研究方法中所介紹的雙雷達合成技術，求取時間為第30分時的三維風場 u 、 v 、 w 。一旦風場的三維分佈情形知道後，便可利用熱動力場反演技術，得到在這個時間的氣壓擾動及溫度擾動相對於其水平平均的偏差量， $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 、 $\theta_c' - \langle \theta_c' \rangle$ 。

3)最後，則是利用 WRF 模式中的理想個案設計另一組同化組，即於模式模擬開始，模擬區域內，位置 $(x, y, z) = (14, 40, 1.5)$ 公里處，置入一個中心擾動溫度為0.5K(即較環境溫度高0.5K)，溫度隨著遠離中心逐漸減弱的熱胞，且此熱胞的水汽僅為「虛擬真實大氣」中熱胞的一半。而這樣設計的目的是要得到一個初始條件較微弱的熱胞，接下來將反演熱動力場、風場同化到此同化組，並經過水汽調整過程後向下進行模擬，探討此方法在改善模式預報結果的可行性。並根據實驗目的不同來改變同化次數、同化時間間距等，測試其改善模式預報結果的程度。

3.3 檢驗方法

本研究使用「觀測系統模擬實驗」(OSSE)，來探討同化雷達觀測資料及其反演之大氣狀態變數在改善模式預報結果上的表現，其好處在於 OSSE 實驗具有「虛擬真實大氣」的模擬，能與其他設計的實驗結果做比較，故可驗證不同方法的改善程度。而為了有定量上的比較結果，於此，利用統

計上的空間相關係數(Spatial Correlation Coefficient, 簡稱 SCC)、相對均方根誤差(Relative Root Mean Square Error, 簡稱 RRMSE)來比較同化結果。於定量降水方面, 則是使用 GS 得分(Gilbert Skill Score)及降雨相關係數(Correlation Coefficient, 簡稱 CC)來初步評估不同設計的實驗在同化後帶來的效益。

3.3.1 同化結果檢驗方法

(A) 空間相關係數

空間相關係數(SCC)定義如下：

$$SCC(A) = \frac{\sum (A_r - \bar{A}_r)(A_t - \bar{A}_t)}{\sqrt{\sum (A_r - \bar{A}_r)^2 \sum (A_t - \bar{A}_t)^2}} \quad (3.2)$$

其中 A 代表壓力場、溫度場、水汽場或風場, 下標的 r 是反演的結果; 而 t 則是「虛擬真實大氣」的模擬結果。另外, \bar{A} 表示反演區域內三維體積的平均值。相關係數的值介於-1~1 之間, 正值愈大則表示反演的氣象場與真實結果有正相關且愈準確。

(B) 相對均方根誤差

相對均方根誤差(RRMSE)定義如下：

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (A_r - A_t)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum A_t^2}} \quad (3.3)$$

其中 A 代表壓力場、溫度場、水汽場或風場，下標的 r 是反演的結果；而 t 是「虛擬真實大氣」的模擬結果；N 則是反演區域內體積的網格點總數。RRMSE 值愈大，表示反演結果和真實結果差異愈大。

3.3.2 定量降水檢驗方法

(A) 相關係數

相關係數(CC)定義如下：

$$CC(A) = \frac{\sum (A_r - \overline{A_r})(A_t - \overline{A_t})}{\sqrt{\sum (A_r - \overline{A_r})^2 \sum (A_t - \overline{A_t})^2}} \quad (3.4)$$

其中 A_r 為預報降雨量， A_t 為實際降雨量，變數上方加一橫線表示整個區域的平均。本研究以地面上某一點每 5 分鐘內累積降雨量來計算一次降雨相關係數，一般預報維持在 0.5 以上都是不錯的表現。

(B) GS 值

GS 得分(Gilbert Skill Score)是由 CSI(Critical Success Index)臨界成功指數演變而來，其概念為利用「預報」與「事件」是否發生的可能性，做交叉統計而獲得。且根據 Schaefer(1990)所提出的四種「預報」與「事件」發生可能性，如表 2.1 可能性分類表，並以以下的計算方式可求得 CSI 及 GS 得分：

$$CSI = \frac{X}{(X + Y + Z)} \quad (3.5)$$

$$C = P \times \frac{E}{T} \quad (3.6)$$

$$GS = \frac{(X - C)}{(X - C + Y + Z)} \quad (3.7)$$

在本研究中，考慮地面上的某一點，若預報模式表現有降水，而實際觀測也確實有降水，此處視「虛擬真實大氣」的模擬結果為實際觀測值，則此點為正確預報，屬於 X 族群。若預報模式表現無降水，而實際觀測值顯示有降水，則是預報忽略，歸為 Y 族群。若預報模式表現有降水，而實際觀測卻無降水，則是錯誤警報計入 Z。其餘表現則歸類為 W 族群。E 表示所有降水點數，P 表示所有預報有降水點數，T 為所有地面的點數，C 則為修正量。CSI 計算如 (3.5) 式，表示成功預報的比例。若以 CSI 中的 X 用 (X-C) 取代，即把 X 減去修正量，便可得到 GS 值。GS 得分的值介於 0~1 之間，GS 愈大表示降水預報愈準確。本研究根據交通部中央氣象局 93 年 11 月 25 日修定之「大雨」的定義：指 24 小時累積降雨量達 50 毫米以上，且其中至少有一小時雨量達 15 毫米以上之降雨現象來定義。當模擬區域地面上某一點每 5 分鐘內的累積降雨量若在 1.25 毫米以上時，視為有降雨現象。而一般預報，若 GS 值維持在 0.4 以上都算是有不錯的表現。

第四章 結果分析

本研究之目地在於探討，同化雷達觀測資料及其所反演的大氣狀態變數在改善模式預報結果上的表現。而根據 Gal Chen(1978)所提出的熱動力反演技術中的三個動量方程式，當得到的 F、G、H 其來源不同時，將影響最後熱力反演的結果。故依此原則，本研究設計的實驗如表(4.1)，其中第一組及第二組實驗乃在檢驗整個研究方法的可行性，而第三組到第六組實驗則是依據當此研究方法應用在真實個案時，可能遇到的問題去做設計。又本研究是在 OSSE 實驗的架構下進行，首先設計一組「natural run」，得到「虛擬真實大氣」的模擬結果。而每組實驗的結果，將會與此「虛擬真實大氣」做比較。

4.1 實驗 1：『研究方法測試一』

實驗 1 探討在沒有風場計算誤差及降低計算 F、G、H 的誤差下，得到一組熱動力場，並同化此組「完美」的熱動力場於模式，看其對模式預報結果的影響。亦即，在熱力反演過程中，所需的 F、G、H 是由「natural run」的氣壓場(π')，並利用公式(2.11)、(2.12)、(2.13)等號右式計算獲得。實驗 1 是以中心擾動溫度 0.5k、水汽 0.5qv(即水汽為「natural run」的一半)為初始條件的熱胞，自時間 00:00 開始向前模擬，並在模擬到第 60 分鐘時，同化由以上方法所得的氣壓場、溫度場，及雷達觀測的回波場。並在同化過程中，於模擬區域中心點，即(x, y)為(21, 21)處，給予一個虛擬探空資料，且此點正位於熱胞邊緣，其回波最大值約為 42dBZ 出現在高

度 3.25 公里處，而垂直速度絕對值最大值 1.4ms^{-1} 則在高度 6.25 公里處，利用此點探空資料在垂直方向的氣壓場、溫度場分佈情形，即可解決擾動氣壓場及溫度場水平平均量 ($\langle \pi' \rangle$ 、 $\langle \theta_c' \rangle$) 等待定常數。最後在進行水汽調整後，得到一組最佳大氣狀態變數，並將其置入模式中，自時間 01:00 向前模擬二小時。比較同化結果與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時的氣壓場、溫度場及水汽混合比場。在定量上，氣壓場的 SCC 值約 0.99，位溫的 SCC 值約 0.99，水汽混合的 SCC 值約 0.99，這顯示同化的結果與「虛擬真實大氣」的數值在空間上有非常高的相似性。而在定性上，則以 $x=15$ 公里所切的垂直剖面圖 ($y-z$ 剖面圖)，各氣象變數的分佈情形，來比較和「natural run」的差異，如圖(4.1)、(4.2)分別為「虛擬真實大氣」及實驗 1 的結果。其中分析「虛擬真實大氣」在 $x=15$ 公里垂直剖面圖(4.1)，由圖(c)：氣壓擾動場垂直方向梯度量，發現在高度 2 公里及 12 公里處各有一個氣壓梯度的極小值，其值分別為 -8hPa 、 -6hPa ；而於高度 6 公里及 14 公里則各有一個氣壓梯度極大值的中心，其值為 8hPa 、 6hPa 。另由圖(d)：位溫擾動場的垂直分布情形，發現在高度 14 公里處，有一暖心中心，其值為 12K ；而在高層 12 公里、17 公里處則各有一個中心值分別 -10K 及 -8K 的冷心結構。將以上結果與實驗 1(4.2)中的圖(c)、圖(d)做比較，發現不論是垂直氣壓梯度場的極大、極小值，以及冷區、暖區的分佈位置，實驗 1 都與「虛擬真實大氣」結果相當一致。

RRMSE 方面，壓力值約為 0.01，表示有 1%的誤差，位溫值為 0.06，表示有 6%的誤差，水汽混合比的值為 0.08，表示有 8%的誤差。此結果顯示反演的壓力場、溫度場及水汽場和正確值在空間上的分佈相當類似，但於數值上仍有些差距。

另外，定量降水預報能力的改善，一直是國內外氣象學者及單位相當重視，因此，本研究也比較實驗 1 和「natural run」在整個模擬區域內有

降雨網格點上，每 5 分鐘的平均累積降雨量，如圖(4.3.a)，其中長虛線為以中心擾動溫度 0.5K、水汽 0.5qv 為初始條件的熱胞向前模擬三小時，且在模擬過程中，沒有同化任何雷達資料及其反演大氣狀態變數的結果。圖中顯示於模擬三小時內，並沒有任何降水產生，換言之以此微弱的初始熱胞向前模擬，並沒有雷暴發展。實驗 1(實線)的結果，則和「natural run」(虛線)的表現相當類似，顯示初始條件微弱的熱胞經同化雷達資料後，的確改善降水預報的結果。實驗 1 和「natural run」，5 分鐘累積降雨量的相關性，隨模擬時間的變化情形如圖(虛線)(4.3.b)，圖中顯示模擬 110 分鐘後，相關性仍有 0.8 左右，且在同化結束時的降雨量相關係數最高，後來不再同化，相關性開始遞減。在本研究中也使用「GS 得分」隨著模擬時間的變化來看實驗 1 的降雨預報能力，如圖(4.3.b)實線所示，圖中顯示模擬 90 分鐘後，GS 得分尚能維持在 0.6 以上，但隨著時間增加，GS 值減小，表示降雨預報的誤差變大了。另外一提的是，此處對於 GS 得分中是否有降雨的定義，乃是以地面上某一網格點，每 5 分鐘的累積降雨量若達 1.25 毫米以上，視為有降雨，反之，則無降雨。在回波場及雨量場的模擬結果，如圖(4.4)、(4.5)分別為「natural run」及實驗 1 模擬至 80、100、120 及 140 分鐘的結果，圖中顯示，兩實驗的雷雨暴不論位置或是強度上，都相當一致。

4.2 實驗 2：『研究方法測試二』

如前所述，實驗 1、2 都是在測試整個研究方法的流程，但兩者最大不同，在於實驗 1 是由「虛擬真實大氣」的氣壓場計算而得 F、G、H 值，實驗 2 則是由「虛擬真實大氣」的風場計算。即 F、G、H 是由「natural run」的風場(u 、 v 、 w)及公式(2.11)、(2.12)、(2.13)等號左式計算獲得。

實驗 2 較實驗 1 有較多的誤差來源，即計算 F、G、H 時的誤差，但卻較接近真實情形。

實驗 2 同樣是以中心擾動溫度 0.5k、水汽為 0.5qv 為初始條的熱胞，自時間 00:00 開始向前模擬，並在模擬至第 60 分鐘時，加入反演的氣壓場、溫度場及雷達回波資料。同樣在同化過程中，於模擬區域中心點，即(x, y) 為(21, 21)處，給予一個虛擬探空資料，解決氣壓場、溫度場擾動量的水平平均值等待定常數，最後將經由水汽調整後的同化結果向前預報 120 分鐘。比較實驗 2 同化結果與「natural run」在第 60 分鐘時的氣壓場、溫度場及水汽混合比場。在定量上，兩實驗在氣壓場的 SCC 值約 0.98，位溫場 SCC 值約 0.87，水汽混合比 SCC 值則為 0.99，這顯示同化的結果與「虛擬真實大氣」的數值在空間上有非常高的相似性。另外在定性上，以 x=15 公里的垂直剖面圖(y-z 剖面圖)，各氣象變數的分佈情形，來比較和「natural run」圖(4.1)的差異。氣壓場結果顯示，氣壓梯度極大、極小值分佈的位置及數值，實驗 2 仍有不錯的表現；而在圖(4.6.d)，位溫擾動場的垂直分布，結果則顯示上層溫度有稍微偏低的情形。

RRMSE 方面，壓力值約為 0.09、位溫值約為 0.64，水汽混合比值為 0.08。以溫度場的 SCC 值來看，實驗 1 為 0.99、實驗 2 為 0.87；而在 RRMSE 值，實驗 1 為 0.06、實驗 2 為 0.64。由此可知，不論是在 SCC 或是 RRMSE 都顯示，當增加熱動力反演的誤差來源時，其同化結果有更加偏離「虛擬真實大氣」的趨勢。

另外，在累積降雨量的預報部份，比較實驗 2 和「natural run」在整個模擬區域內有降雨網格點上，平均每 5 分鐘的累積降雨量，如圖(4.7.a)。其中長虛線仍是以微弱熱胞為初始條件，且在模擬過程中沒有同化任何雷達資料的模擬結果，同樣沒有任何降水產生；實驗 2(實線)的結果，其和「natural run」(短虛線)比較，雖然在模擬時間內有高估或低估情形，但

差異並不大。另外，實驗 2 和「natural run」5 分鐘累積降雨量的相關性，隨模擬時間的變化情形如圖(4.7.b)，圖中虛線顯示，實驗 2 的相關性在 0.8 以上，僅能維持約 80 分鐘，而實驗 1 則能持續 110 分鐘左右。另外，使用 GS 得分隨模擬時間的變化來看實驗 2 的降雨預報能力，如圖(4.7.b)實線，圖中顯示模擬 70 分鐘後，GS 得分都能維持在 0.6 左右，隨著時間增加，GS 值減小，表示降雨預報的誤差變大。與實驗 1 結果相比較後，發現實驗 2 中，不論是相關性或是 GS 值，其隨著時間的遞減速度都較快，亦即實驗 2 對於長時間降雨預報的能力不如實驗 1。在回波場方面，如圖(4.4)，為實驗 2 模擬至 80、100、120 及 140 分鐘時，與「natural run」相比較的結果，圖中顯示實驗 2 在第 100 分鐘時已分裂為一個向左走、一個向右走的雷雨胞，較「natural run」及實驗 1 分裂的時間還要早，但主要結構的強度與位置，仍和「natural run」相似。

4.3 實驗 3：『同化次數測試』

實驗 3 到實驗 6，則是根據處理真實個案時所可能遇到的狀況去設計。由於實際作業，使用都卜勒雷達此遙測儀器來觀測時，僅能得到徑向風方向的風分量，無法得到垂直於徑向風方向的風場，故在實驗 3 以後的四個實驗是採用 Liou(2009)所發展的雙都卜勒風場合成技術，來取得風場的三維分布情形。並將「natural run」所得到的風場投影在兩座「虛擬雷達」的徑向風方向，以此徑向風進行風場反演後，可得風場三維結構。當風場 u 、 v 、 w 已知後，則可使用熱動力反演技術，得到氣壓場及溫度場，而此時存在的誤差當然較實驗 1 及實驗 2 所得到的反演熱動力場來的多。

實驗 3 乃是以假設真實情形下，所可能反演得到的熱動力場，來測試同化此熱動力場及都卜勒雷達觀測資料的次數，對於改善模式預報結果的

影響。不同於實驗 1、2 是給予一個虛擬探空資料，在實驗 3 中，解決未知擾動氣壓場及溫度場水平平均量的方法，是利用模式預報到同化當時的氣壓場及溫度場計算獲得。故其存在的風險為，當模式的預報結果不理想時，將會影響最後溫度場及氣壓場的同化結果，但此方法比較接近真實情況，畢竟在實際作業上，並不會在每次同化時，都有提供描述當時真實大氣的探空資料。

實驗 3 的實驗設計，如圖(4.8)。

實驗 3-1：同化一次的實驗，即以中心擾動溫度 0.5k、水汽 0.5qv 的熱胞，自時間 00：00 開始向前模擬，並在模擬至 01：00 時，同化此時反演的大氣狀態變數及雷達觀測資料。

實驗 3-2：同化二次的實驗，如同實驗 3-1 的初始場，但在模擬至 00：50 及 01：00 時，分別進行二次同化。

實驗 3-3：同化三次的實驗，其初始場設定也和實驗 3-1 相同，但於模式模擬到 00：40、00：50 及 01：00 時，分別進行三次同化。實驗 3-1、3-2 及 3-3 這 3 組實驗都是自第 60 分同化完成後，將其結果向前預報 120 分鐘，至 03:00 結束。

分別比較三組實驗同化結果與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時的風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的差異性。定量上，SCC 及 RRMSE 結果如表(4.2)，可以明顯看出氣壓場、風場及水汽場在 3-1、3-2、3-3 實驗中，差異不大，並且和「虛擬真實大氣」結果相當一致。唯獨在位溫擾動場的部份，隨著同化次數的增加，和「虛擬真實大氣」差異愈大。另外，氣壓場在垂直方向梯度的相對均方根誤差於三組實驗也均在 1.2 以上，造成位溫及氣壓結果如此不理想的原因推測為，實驗 3 利用模式預報結果所得到氣壓擾動及溫度擾動的水平平均場和真實結果差異很大，以這樣的結果進行同化時，自然會造成同化結束後的溫度場有如此大的誤差。另外在

定性上，同樣以 $x=15$ 公里所切的垂直剖面圖($y-z$ 剖面圖)中，各氣象變數的分佈情形，來比較三組實驗如圖(4.9)、(4.10)、(4.11)和「natural run」圖(4.1)的差異。其中氣壓擾動垂直梯度量及位溫擾動場在三組實驗中，圖(4.9.c;d)、(4.10.c;d)及(4.11.c;d)所示，於上層部份都有略微高估情形，並以實驗 3-3 差異最大，其位於高度 14 公里的垂直氣壓梯度、暖心中心極大值分別為 10hPa、18k。

在累積降雨量預報部份，比較了實驗 3-1、3-2 及 3-3 和「natural run」，平均降雨網格點上每 5 分鐘累積降雨量隨模擬時間的變化情形，如圖(4.12.a)，其中長虛線是以微弱熱胞為初始條件向前模擬 3 小時，且在模擬過程中沒有同化任何資料的結果，其顯示並沒有任何降水產生；而虛點線、點線及實線，分別為實驗 3-1、3-2 及 3-3 的結果，發現三組實驗，平均降雨網格點 5 分鐘累積降雨量隨時間的變化曲線相當類似。並和「natural run」(虛線)的結果做比較，三組實驗相對於「natural run」的最大差異在正負 0.4 毫米之間。而實驗 3-2、3-3，即同化二次及三次的實驗，則較實驗 3-1，同化一次的實驗更接近「natural run」的結果。雖然，在某些時間內，平均 5 分鐘累積降雨量有高估或低估的情形，此三組實驗與「natural run」，隨著模擬時間的相關性如圖(4.12.b)，圖中顯示模擬 70 分鐘後，相關性仍有 0.8 以上，且在同化結束時的降雨量相關係數最高，後來不再同化，相關係數開始遞減。而於模擬 100 分鐘後，實驗 3-1 和「natural run」的相關性只剩 0.5，而實驗 3-2、3-3 為 0.6，略較 3-1 的結果理想。在此，並使用「GS 得分」隨模擬時間的變化，來看三組實驗在降雨預報能力上的表現，如圖(4.12.c)，圖中顯示模擬 60 分鐘後，GS 得分仍能維持在 0.5 以上，隨著時間增加，GS 值減小，於模擬時間 160 分時，GS 得分已降至 0.4 左右，且發現在模擬時間後期，實驗 3-2、3-3 的表現略較 3-1 理想。另與實驗 1 及 2 結果相比較，則發現實驗 3 中，不論是相關

性或是 GS 值，其隨著時間的遞減速度都較快，亦即實驗 3 中各實驗對於長時間降雨預報的能力不如實驗 1 及實驗 2。在回波場方面，如圖(4.13)為三組實驗分別模擬至 80、100、120 及 140 分鐘的結果，發現三組實驗中雷雨胞不論位置或是強度上相當一致，並與「natural run」(4.4)相比較後，發現實驗 3 對雷雨胞的預報雖不如實驗 1、2，但其主要結構還是有呈現出來。

4.4 實驗 4：『同化時間間距測試』

如同實驗 3，實驗 4 仍是假設真實情形下所可能反演得到的熱動力場，來測試同化此熱動力場及都卜勒雷達觀測資料的時間間距，其中同化次數都為二次，看其對於改善模式預報結果的影響。亦即以中心擾動溫度 0.5k、水汽 0.5qv 的熱胞初始化模式，並於模擬期間，依據同化時間間距分別為 10、15 及 20 分鐘來同化都卜勒雷達資料，實驗設計如圖(4.14)。此外，實驗 4 與實驗 3 皆採用相同方式來計算擾動氣壓場及溫度場的水平平均量。

實驗 4-1：為同化時間間距 10 分鐘的測試，即在模式模擬至 00:50 及 01:00 時分別同化觀測資料及反演的大氣狀態變數。

實驗 4-2：同化時間間距 15 分鐘的測試，分別在 00:45 及 01:00 進行同化雷達資料。

實驗 4-3：同化時間間距 20 分鐘的測試，即在 00:40 及 01:00 時進行資料的同化。三組實驗都於模擬時間 01:00 時完成同化，並以此同化結果，向前預報 120 分鐘。首先比較在同化結束第 60 分鐘時，三組實驗和「natural run」在定量上，氣壓梯度場、風場、擾動位溫度場及水汽混合比場的差異，包含有空間相關係數及相對均方根誤差，如表(4.3)。空間相關係數及相對均方根誤差結果顯示，在 4-1、4-2、4-3 實驗中，氣壓場、風場及水汽場差異不大，而且和控制組實驗結果相當一致。唯獨氣壓場在垂直方向梯度

的相對均方根誤差，以及位溫擾動場的 SCC、RRMSE 結果較不理想，和控制組實驗差異不小。造成如此不理想的原因，如同實驗 3，都是由於不佳的模式預報結果，因其所產生誤差極大的擾動氣壓及溫度水平平均場而影響同化結果。定性上，分析以 $x=15$ 公里所切的垂直剖面圖($y-z$ 剖面圖)，各氣象變數的分佈情形，來比較三組實驗如圖(4.15)、(4.16)、(4.17)和「natural run」圖(4.1)的差異。結果發現，氣壓擾動場垂直方向梯度量及位溫擾動場在三組實驗，如圖 4.15~17 中的圖(c)、圖(d)所示，於上層部份都有高估情形，並以溫度的誤差較為明顯。

累積降雨量預報方面，比較實驗 4-1、4-2 及 4-3 和「natural run」，平均降雨網格點上每 5 分鐘累積降雨量隨模擬時間的變化情形，如圖(4.18. a)，其中實驗 4-1(實線)、4-2(點線)及 4-3(虛線)的變化曲線幾乎是重疊的。並和「natural run」(長虛線)的結果做比較，三組實驗相對於「natural run」的最大差異在正負 0.4 毫米之間。雖然在某些時間內，平均 5 分鐘累積降雨量，三組實驗與「natural run」的比較的確有高估或低估的情形，但其隨著模擬時間的相關性如圖(4.18. b)，圖中顯示，自同化結束第 60 分鐘開始向前模擬 70 分鐘後，相關性仍有 0.8 以上，而於模擬時間 160 分左右，3 組實驗和「natural run」的相關性只剩 0.6。

我們也可以從「GS 得分」隨模擬時間的變化，來看三組實驗在降雨預報能力上的表現，如圖(4.18. c)。圖中顯示模擬至第 70 分左右，GS 得分仍維持在 0.5 以上，隨著時間增加，GS 值減小，於模擬時間 160 分時，GS 得分已降至 0.4 以下，且發現於整個模擬時間內，實驗 4-1、4-2 及 4-3 的相關性或 GS 值隨時間變化的曲線走勢幾乎一致。結果顯示，同化時間間距的不同，對最終預報結果的影響並不大。在回波場方面，如圖(4.19)為三組實驗分別模擬至 80、100、120 及 140 分鐘的結果，發現三組實驗中雷雨胞不論位置或是強度上都相當一致，並與「natural run」(4.4)結果比較，

顯示雖然仍有差異存在，但其主要結構還是有呈現出來。

4.5 實驗 5：『探空資料的影響』

實驗 5 的設計則是根據實際作業時，在同化過程中不會每次提供探空資料，此資料可得我們所需的氣壓擾動及溫度擾動水平平均場等待定常數。故此實驗主要在測試同化過程中，有無探空資料及不同同化策略，對模擬結果所造成的影響，其實驗設計如圖(4.20)。四組實驗均以中心擾動溫度為 0.5k、水汽 0.5qv 的熱胞來初始化模式，且實驗 5-1、5-2、5-3 及 5-4 都於模擬第 60 分鐘時，進行一次有探空資料的同化，而此探空正位於模擬區域(x, y)為(21, 21)處；其中實驗 5-1 只同化一次；而實驗 5-2、5-3 分別於第 70 分鐘、第 50 分鐘，進行另一次無探空資料的同化；實驗 5-4 則是於第 50 及 70 分，進行了另二次無探空資料的同化。這些第 60 分鐘以外的同化，是利用模式預報到同化當時的結果去計算氣壓擾動及溫度擾動的水平平均場。表(4-4)，為「natural run」和四組實驗在同化結束時，各氣象變數在定量上 SCC 及 RRMSE 的比較結果。

圖(4.21)為「natural run」模擬至 01:10 時，沿 X=15km 各氣象變數的垂直剖面圖；分析圖(c)：氣壓擾動場垂直方向梯度量，發現在高度 1 公里及 13 公里處各有一個氣壓梯度極小值中心，其值分別為-16hPa、-12hPa；在高度 6 公里及 15 公里各有一個氣壓梯度極大值中心，其值為 8hPa、4hPa。另由圖(d)：位溫擾動場的垂直分布情形，則是發現在高度 15 公里處，有一個暖心中心，其值為 8K；在高層 13 及 18 公里處則各有一個冷心結構。圖(4.22)、(4.23)、(4.24)、(4.25)分別為四組實驗同化結束時各氣象變數的結果。結果顯示，與「虛擬真實大氣」有較大差異為：實驗 5-2 及 5-4 的氣壓擾動場在 y 方向的梯度量有低估情形，而在 z 方向梯度量及位溫擾

動場則是於上層有略為高估的現象。由定量上及定性上的結果分析，發現於第 60 分鐘有探空資料的同化結束後，再進行另一次無探空資料的同化，如實驗 5-2，將導致原本溫度場的 SCC 在第 60 分時有高達 0.83 的值，但第 70 分時僅有 0.78 準確度降低的結果，推測其原因是由於第 70 分進行同化時，使用模式預報結果得到的溫度水平平均場存在較大的誤差所導致。

在累積降雨量的預報部份，比較四組實驗和「natural run」，平均降雨網格點上每 5 分鐘的累積降雨量隨時間變化的結果，如圖(4.26.a)，實線為「natural run」的模擬結果。圖中顯示，實驗 5-1(長虛線)及 5-3(圓點實線)曲線走勢極為相似，這兩組實驗都在第 60 分鐘同化之後，不再進行另一次同化而直接向前模擬 120 分鐘的結果；另外，實驗 5-2(菱形虛線)則是與 5-4(箭頭實線)結果相類似，都在第 60 分鐘後，進行另一次第 70 分鐘的資料同化。顯然在第 60 分鐘同化之後，是否有進行另一次同化將造成最終結果的差異。另外，在第 60 分鐘同化之前，是否有進行另一次無探空資料的同化，對於最終降水方面的模擬結果影響並不大。四組實驗和「natural run」在模擬時間內，平均 5 分鐘的累積降雨量最大差異約為 0.5 毫米。若分析四組實驗與「natural run」，平均 5 分鐘累積雨量相關性隨模擬時間的變化情形，如圖(4.26.b)。圖中顯示，自第 70 分鐘向前模擬至第 130 分後，四組實驗相關性仍有 0.8 左右，但隨模擬時間繼續增加時，其中實驗 5-2 及 5-4 於第 160 分鐘時，相關性為 0.8 左右，相較於實驗 5-1 及 5-3 僅有 0.6，實驗 5-2、5-4 的表現明顯較實驗 5-1、5-3 來的優異。在降雨預報能力方面，如圖(4.26.c)，圖中顯示四組實驗模擬至第 160 分鐘時，GS 得分都能維持在 0.4 左右，且隨時間增加，GS 值減小，表示降雨預報的誤差變大了。同樣的，實驗 5-2 及 5-4 在 GS 得分表現上，也較實驗 5-1 及 5-3 好。由以上結果顯示，在第 60 分鐘有探空資料的同化後，再進行另一次無探空資料的同化，可進一步改善降雨方面的預報結果。回波場方面，

如圖(4.27)為四組實驗分別模擬至 80、100、120 及 140 分鐘的結果，同樣的實驗 5-1、5-3 中雷雨胞不論位置或是強度上還是相當一致，而 5-2 則是與 5-4 雷同。

4.6 實驗 6：『使用垂直動量方程式計算溫度場測試』

由於在無探空資料的同化過程中，必需藉由模式預報的氣壓場及溫度場來計算氣壓擾動及溫度擾動的水平平均值，如實驗 3 結果所示，此方法可能會造成同化後的溫度場準確性降低。故於實驗 6 中，同化反演變數時，測試只同化氣壓場，而在溫度場部份，則是利用垂直動量方程式計算獲得，以確保當模式預報的溫度場不理想時，不會因使用其計算的水平平均場，間接影響到溫度場在同化結果的準確度。實驗 6-1 及 6-2 皆以中心擾動溫度為 0.5k、水汽 0.5qv 的熱胞來初始化模式，並於模擬至第 60 分鐘時，進行無探空資料的同化；其中實驗 6-1，同化經由熱力反演得到的氣壓擾動及溫度擾動偏差量，此時是利用模式預報結果來得到兩氣象場的水平平均值。而實驗 6-2，僅同化反演的氣壓擾動場偏差量 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ ，並利用模式結果來決定其水平平均場 $\langle \pi' \rangle$ ，接下來將得到的氣壓場 π' 代入垂直動量方程式 (2.13)，如下所示：

$$-\frac{\partial \pi'}{\partial z} + g \frac{\theta'_c}{\theta_0 \theta_{v0}} = -H$$

其中，H 可由雷達所觀測風場計算獲得，而 θ_0 及 θ_{v0} 為位溫、虛位溫的基本態，最後由上式可得擾動虛雲位溫場 θ'_c 。由 θ'_c 的定義(2.16)式，則 θ'_c 和擾動位溫場 θ' 有以下關係：

$$\theta'_c = \theta' + (0.61q'_v - q'_c)\theta_0$$

最後可得位溫及溫度場。實驗 6-2 即是在模擬至第 60 分時，同化由以上方法所得到的溫度場及氣壓場，並將同化結果向前模擬 120 分鐘。分別比較二組實驗同化結果與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時的風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的差異性。定量上，SCC 及 RRMSE 結果如表 (4.4)，可以明顯看出氣壓場、風場及水汽場在 6-1、6-2 實驗中，差異不大，並且和「虛擬真實大氣」結果相當一致，但氣壓場在垂直方向梯度的表現較不理想，其相對均方根誤差於二組實驗均在 1.2 以上。而在溫度場方面，使用新方法後，即 6-2 實驗，於同化結果的改善並沒有達到我們預期的希望，其中 SCC 值 0.5、RRMSE 值 1.07 的結果，反而較實驗 6-1 的 SCC 值 0.73、RRMSE 值 0.72 還糟。推測其原因為：於實驗 6-2，利用模式預報的氣壓擾動量水平平均場 $\langle\pi\rangle$ 而進一步得到的氣壓場，已存在相當的誤差，故以此氣壓場經由公式(2.13)、(2.16)計算得到的溫度場，除了計算誤差外，還累加了由氣壓場所來的誤差，故造成最後有較大的 RRMSE 值。另外在定性上，同樣以 $x=15$ 公里所切的垂直剖面圖($y-z$ 剖面圖)，各氣象變數的分佈情形，來比較二組實驗如圖(4.28)、(4.29)和「natural run」圖(4.1)的差異。圖中顯示，兩組實驗不論是擾動氣壓場垂直梯度量圖(c)或擾動位溫場圖(d)，於上層部份都有略為高估的現象，其中又以實驗 6-2，的擾動溫度場更為嚴重，且於主要結構周圍出現許多錯誤擾動場。

累積降雨量預報部份，比較實驗 6-1、6-2 和「natural run」，平均降雨網格點上每 5 分鐘累積降雨量隨模擬時間的變化情形，如圖(4.30.a)，其中虛線為以微弱熱胞為初始條件向前模擬三小時，且在模擬過程中沒有同化任何資料的結果，其顯示並沒有任何降水產生；點線、短虛線，分別為實驗 6-1、6-2 的結果，圖中顯示實驗 6-2 對於累積雨量的模擬結果和「natural run」差異大，其最大差異在正負 0.4 毫米以上，故於模擬後期較不能掌握降雨的預報。另外，實驗 6-1、6-2 和「natural run」隨模擬

時間的相關性如圖(4.30.b)，於同化結束向前模擬的開始，兩實驗的表現極為一致，但在模擬至第 120 分鐘後，實驗 6-2 與「natural run」相關性迅速遞減，造成和實驗 6-1 的曲線差距變大。於模擬時間約第 175 分鐘時，實驗 6-2 的相關性僅剩 0.1，但實驗 6-2 仍有 0.5 以上。最後，使用「GS 得分」隨模擬時間的變化，來看二組實驗在降雨預報能力上的表現，如圖(4.30.c)，圖中顯示模擬至第 90 分鐘左右，二者 GS 得分都能維持在 0.6 以上，隨著時間增加，GS 值減小，且實驗 6-2 遞減幅度大於 6-1，於模擬時間 02:30 時，GS 得分已降至 0.2。由以上雨量的預報能力來看，不論是相關性或是 GS 值，實驗 6-2 的表現都不如 6-1，顯示使用新方法來解決當模式預報溫度場不理想時，影響最後溫度場在同化結果準確度的問題是不可行的。在回波場方面，如圖(4.31)則為實驗 6-1、6-2 分別模擬至 80、100、120 及 140 分鐘的結果。

第五章 結論與未來展望

5.1 結論

本研究使用雙都卜勒風場合成方法、熱動力反演技術及新發展的水汽調整方法，以得到一組最佳大氣狀態變數，並探討同化雷達觀測資料及此組狀態變數於數值模式，對最後模擬結果的影響，尤其是在定量降水預報方面的改善程度。由上面各章節之探討，得到以下初步結論：

(1)六組實驗皆以中心擾動溫度 0.5K，水汽 0.5qv 為初始條件的微弱熱胞，向下進行模擬，並於模擬期間同化雷達觀測資料及其反演之各大氣狀態變數，由降雨預報結果顯示，的確改善了模式預報結果。

(2)由於使用熱力反演方法得到的氣壓場及溫度場，僅為兩氣象場相對於其水平平均的偏差量 $\pi' - \langle \pi' \rangle$ 及 $\theta_c' - \langle \theta_c' \rangle$ ，故在同化過程中，如何決定其水平平均場 $\langle \pi' \rangle$ 、 $\langle \theta_c' \rangle$ ，於最後提昇同化結果的準確性上，扮演相當重要的角色。如實驗 5-1、實驗 6-1 均在第 60 分鐘進行資料的同化，但前者主要使用探空資料，後者則為利用模式預報結果分別得到 $\langle \pi' \rangle$ 、 $\langle \theta_c' \rangle$ 。而造成實驗 5-1 同化結果不如實驗 6-1 的原因為，當模式預報不理想時，使用方法二將會得到誤差較大的水平平均場 $\langle \pi' \rangle$ 、 $\langle \theta_c' \rangle$ ，並進一步影響最後同化的結果。

(3)在實際作業上，因為同化過程中不會每次皆提供探空資料，來做為決定氣壓擾動及溫度擾動水平平均場等待定常數的參考值。故於實驗 5 中的四組實驗分別探討同化過程中，有無探空資料及不同同化策略，對模擬結果所造成的影響。其結果顯示，於第 60 分鐘有探空資料同化之前，是否有進行另一次無探空資料的同化，對最終降水方面的模擬結果影響並不大。而在第 60 分鐘同化之後，是否有進行另一次無探空資料的同化，將造

成 5-1、5-3 和 5-2、5-4 兩類結果的差異。由四組實驗與「虛擬真實大氣」累積降雨量相關係數、GS 得分等隨時間的變化情形，顯示第 60 分鐘有探空資料同化後，再進行另一次無探空資料的同化，可進一步改善降雨的預報結果。

(4)同化次數、同化時間間距的測試上，資料顯示同化次數二、三次的結果極為相近，比同化一次結果略佳一些，但並非差異顯著；從同化時間間距來看，當同化時間間距分別為 10、15 及 20 分鐘時，結果幾乎一致。故嚴謹上來看，於同化策略上改變這兩項因素時，對最後降雨預報結果影響並不大。即對本研究中生命期僅有三小時的 supercell 理想個案而言，同化次數二次及同化時間間隔為 10~20 分鐘的同化策略就足夠了。

5.2 未來展望

由於本研究皆在觀測系統模擬實驗的架構下進行，未來最重要的目標即是將此同化雷達觀測資料的新方法應用在真實個案上，期望在實際氣象作業上能加強對強降水事件的預報，以降低因嚴重降水所造成的災害。而在應用於真實個案時，將會考慮地型、資料點數及資料品質等，對於最後改善預報結果的影響。

到目前為止，本研究在 OSSE 實驗架構下進行的各組實驗，皆不考慮實際作業上，所可能包含的各項觀測誤差，並假設在整個模擬區域內都有觀測資料進行同化。故於未來工作，將根據都卜勒雷達實際操作及資料取得上所遇及的問題進行測試。其中包含，「虛擬雷達」位置、雷達波束寬、雷達可看範圍、雷達方位角及仰角的限制等不同，看其對最後模擬結果的影響。

另外，本研究於同化時間點的設計上，皆考慮雷暴生命期中，其發展

已達成熟期且平均最大垂直速度為 30ms^{-1} 以上的階段，即在模擬時間第 40 至第 70 分鐘，並沒有於雷暴發展初期，進行本研究方法的測試。故於未來將更進一步探討本研究方法於雷暴發展初期應用上的可行性，期望能在雷暴發展的早期就能將雷達資料同化進入預報模式中，掌握雷暴的行為，以提昇降水預報的準確性。

最後，吾人將針對本研究所提出之新方法—「水汽調整方法」，做更深入的測試，看其對於提昇同化結果準確度及改善降水預報程度的可能性。

參考文獻

- 鐘高陞、廖宇慶、陳台琦，2002：由都卜勒風場反演三維熱動力場的可行性研究-以台灣地區飆線個案為例。大氣科學，第30期，313-330。
- Crook, A., 1994a : Numerical simulations initialized with radar-derived winds. Part I : Simulated data experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1189-1203.
- _____, and J. D. Tuttle , 1994b : Numerical simulations initialized with radar-derived winds. Part II : Forecasts of three gust-front cases . *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1204-1217.
- Gal-Chen, T. J., 1978 : A method for the initialization of the anelastic equations : Implications for matching models with observations. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 587-606 .
- Heideman K.F., and J. M. Fritsch , 1988 : Forcing mechanism and other characteristics of significant summertime precipitation. *Wea. Forecasting*, **3**, 115-130.
- Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *Meteor. Monogr.*, **10**, American Meteorological Society, Boston, North America, 84pp.
- Lilly, D.K., 1990 : Numerical prediction of thunderstorms - has its time come? *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **116**, 779-798
- Lin, Y., P. S. Ray, and K. W. Johnson, 1993 : Initialization of a modeled convective storm using Doppler radar-derived fields. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2757-2775

- Liou, Y.-C., 2001 : The derivation of absolute potential temperature perturbations and pressure gradients from wind measurements in three-dimensional space . *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**, 577-590.
- _____, T.C. Chen Wang, and K.S. Chung, 2003: A three-dimensional variational approach for deriving the thermodynamic structure using Doppler wind observations—An application to a subtropical squall line. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1443 - 1454.
- _____, Y.J. Chang, 2009: A variational multiple-Doppler radar three-dimensional wind synthesis method and its impact on thermodynamic retrieval. *Mon. Wea. Rev.* (Accepted)
- Rogers R. R., and M.K. Yau ,1989 : A short course in cloud physics, Pergamon, Oxford, England, 293pp.
- Roux, F., 1985: Retrieval of thermodynamic fields from multiple-Doppler radar data using the equations of motion and the thermodynamic equation. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 2142 - 2157.
- _____, 1988: The West African squall line observed on 23 June 1981 during COPT 81: Kinematics and thermodynamics of the convective region. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 406 - 426.
- Roux, F., and J. Sun, 1990: Single-Doppler observations of a West African squall line on 27-28 May 1981 during COPT 81: Kinematics, thermodynamics and water budget. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1826 - 1854.
- Schaefer, J. T., 1990 : The Critical Success Index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570-575

- Shapiro, A., S. Ellis, and J. Shaw, 1995: Single-Doppler velocity retrievals with Phoenix II data: Clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1265 – 1287.
- Snyder, C., and F. Zhang, 2003: Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1663 – 1677.
- Sun, J., and N. A. Crook, 1997: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1642 – 1661.
- _____, _____, 1998: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 835 – 852.
- _____, _____, 2001: Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Wea. Forecasting*, **16**, 117 – 132.
- Tong, M., and M. Xue, 2005: Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1789 – 1807.
- Weisman, M.L., and R. Rotunno, 2000: The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1452 – 1472.
- Weygandt S.S., A. Shapiro, and K.K. Droegemeier , 2002a : Retrieval of model initial fields from single-Doppler observations of a

supercell thunderstorm. Part I : Single-Doppler velocity retrieval. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 433-453

____, _____, and _____, 2002b : Retrieval of model initial fields from single-Doppler observations of a supercell thunderstorm. Part II : Thermodynamic retrieval and numerical prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 454-476

Xiao, Q., Y.H. Kuo, J. Sun, W.C. Lee, E. Lim, Y.R. Guo, and D.M. Barker, 2005: Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR System: ImPact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 768 - 788

表 2.1 四種「預報」與「事件」發生可能性分類表。

(摘自 Schaefer, 1990)

		FORECASTS		
		YES	NO	
EVENTS	YES	X	Y	$E = X + Y$
	NO	Z	W	$T = X + Y + Z + W$
		$P = X + Z$		

表 4.1 本研究所設計的六組實驗，實驗 1、2 乃在檢驗整個研究方法的可行性；實驗 3、4 分別測試同化次數及時間間距；實驗 5、6 為此研究方法應用在真實個案時，可能遇到的問題去做設計。

實驗目的	
實驗 1	研究方法測試一
實驗 2	研究方法測試二
實驗 3	同化次數測試
實驗 4	同化時間間距測試
實驗 5	探空資料的影響
實驗 6	使用垂直動量方程式計算溫度場測試

表 4.2 實驗三與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時，風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的 SCC 及 RRMSE 值。

SCC	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
3-1	0.96	0.92	0.72	0.73	0.99	0.99	0.99	0.94
3-2	0.96	0.92	0.72	0.36	0.99	0.99	0.99	0.94
3-3	0.96	0.92	0.65	0.12	0.99	0.99	0.99	0.94

RRMSE	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
3-1	0.32	0.42	1.28	2.17	0.08	0.01	0.05	0.37
3-2	0.32	0.42	1.26	1.54	0.08	0.01	0.04	0.37
3-3	0.32	0.42	1.47	2.42	0.08	0.01	0.04	0.37

表 4.3 實驗四與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時，風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的 SCC 及 RRMSE 值。

SCC	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
4-1	0.96	0.92	0.72	0.36	0.99	0.99	0.99	0.94
4-2	0.96	0.92	0.73	0.39	0.99	0.99	0.99	0.94
4-3	0.96	0.92	0.73	0.36	0.99	0.99	0.99	0.94

RRMSE	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
4-1	0.32	0.42	1.28	2.17	0.08	0.01	0.05	0.37
4-2	0.32	0.42	1.22	1.51	0.08	0.01	0.04	0.37
4-3	0.32	0.42	1.33	1.57	0.08	0.01	0.04	0.37

表 4.4 實驗五與「虛擬真實大氣」於同化結束時，風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的 SCC 及 RRMSE 值。

5-1(60)	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
SCC	0.96	0.92	0.82	0.83	0.99	0.99	0.99	0.94
RRMSE	0.32	0.42	0.58	0.71	0.07	0.01	0.05	0.37

5-2(70)	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
SCC	0.94	0.91	0.86	0.78	0.99	0.99	0.99	0.95
RRMSE	0.35	0.44	0.56	0.85	0.09	0.01	0.04	0.34

5-3(60)	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
SCC	0.96	0.92	0.83	0.83	0.99	0.99	0.99	0.94
RRMSE	0.32	0.42	0.59	0.71	0.08	0.01	0.04	0.37

5-4(70)	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
SCC	0.95	0.91	0.86	0.78	0.99	0.99	0.99	0.95
RRMSE	0.35	0.44	0.56	0.84	0.09	0.01	0.04	0.34

表 4.5 實驗六與「虛擬真實大氣」在第 60 分鐘時，風場、氣壓梯度場、位溫度擾動場及水汽混合比場的 SCC 及 RRMSE 值。

SCC	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
6-1	0.96	0.92	0.72	0.73	0.99	0.99	0.99	0.94
6-2	0.96	0.92	0.72	0.50	0.99	0.99	0.99	0.94

RRMSE	dp/dx	dp/dy	dp/dz	pt'	q_v	u	v	w
6-1	0.32	0.42	1.28	0.72	0.08	0.01	0.05	0.37
6-2	0.32	0.42	1.28	1.07	0.08	0.01	0.05	0.37

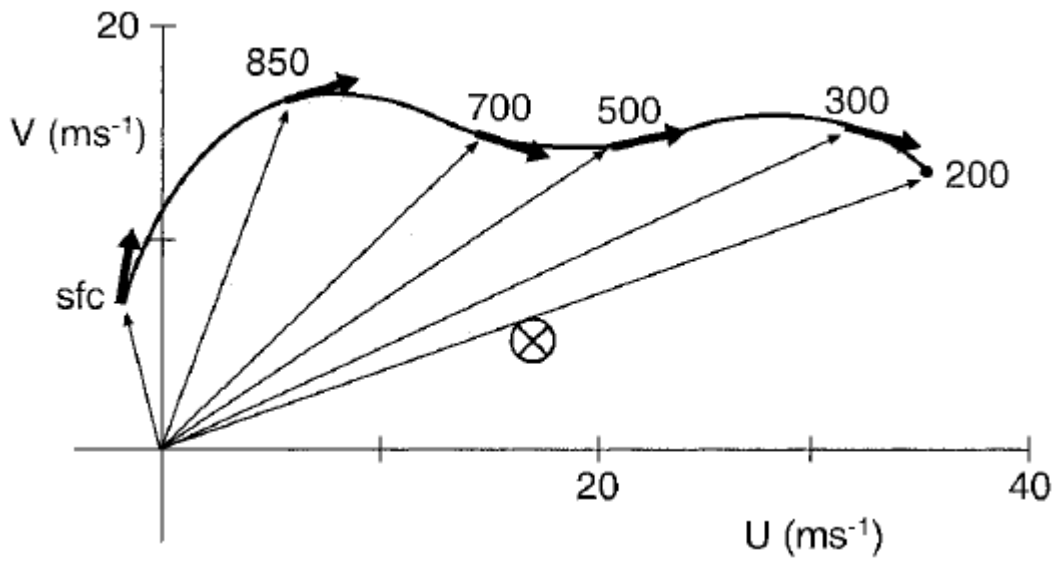


圖 3.1 各個高度的風場相對於風暴移速的合成探空資料(ms^{-1})，此為 62 個龍捲風暴個案的平均探空結果。(摘自 Rotunno, 1999)

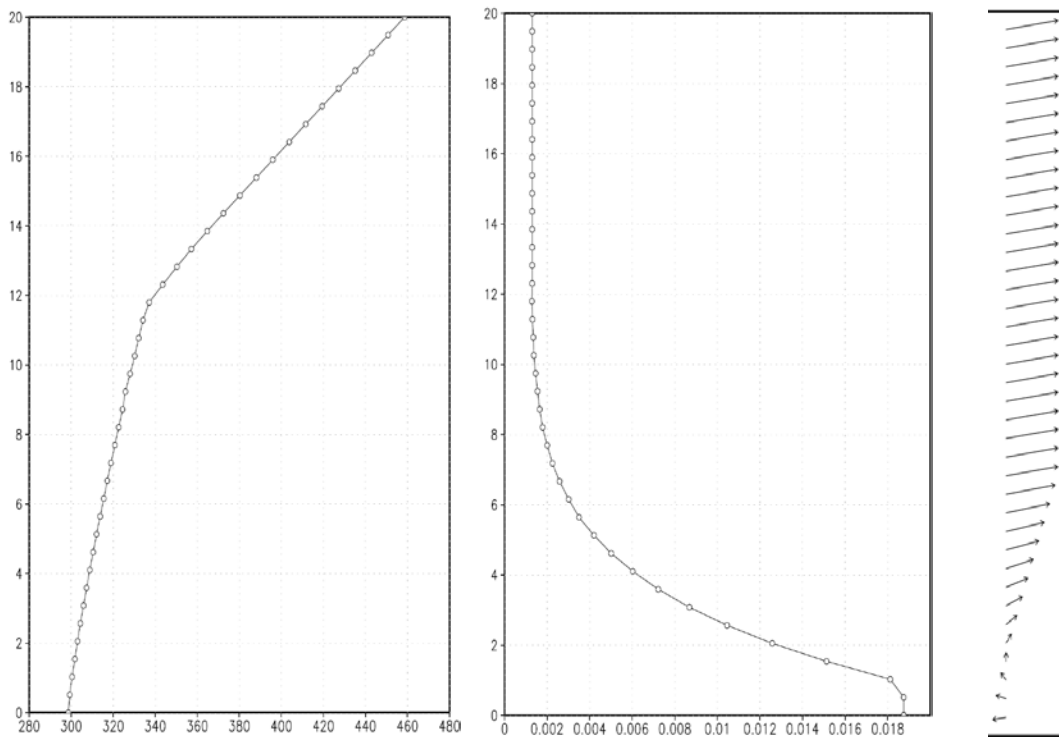


圖 3.2 WRF 模式所提供的環境探空資料所繪各變數隨高度的變化圖。由左而右依序是位溫(K)、水汽混合比(g/kg)與水平風向。

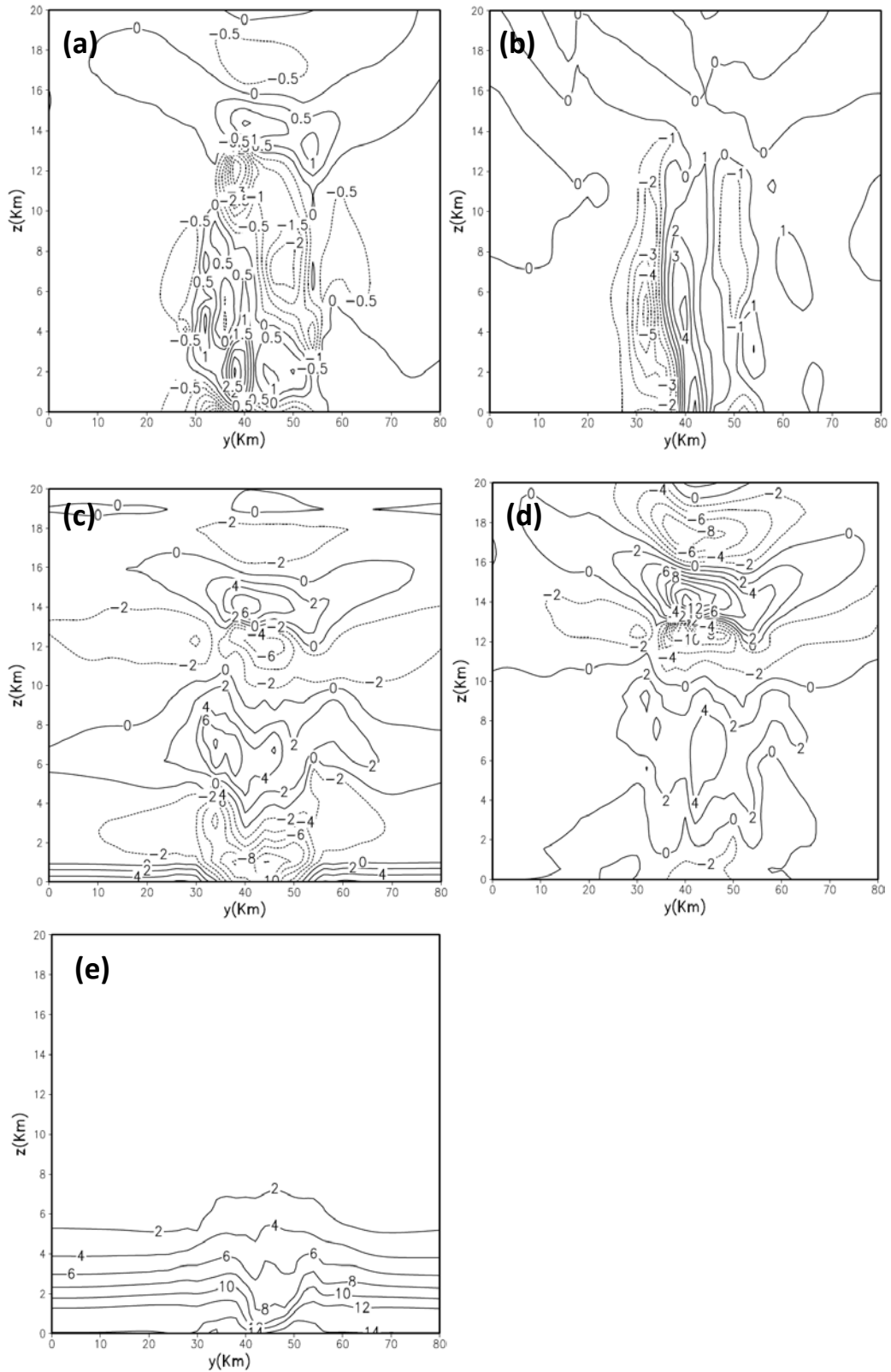


圖 4.1 「natural run」於第 60 分鐘時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；
 (c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times \text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，
 等值線間距為 2 度，單位為 K；(e) 水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg。

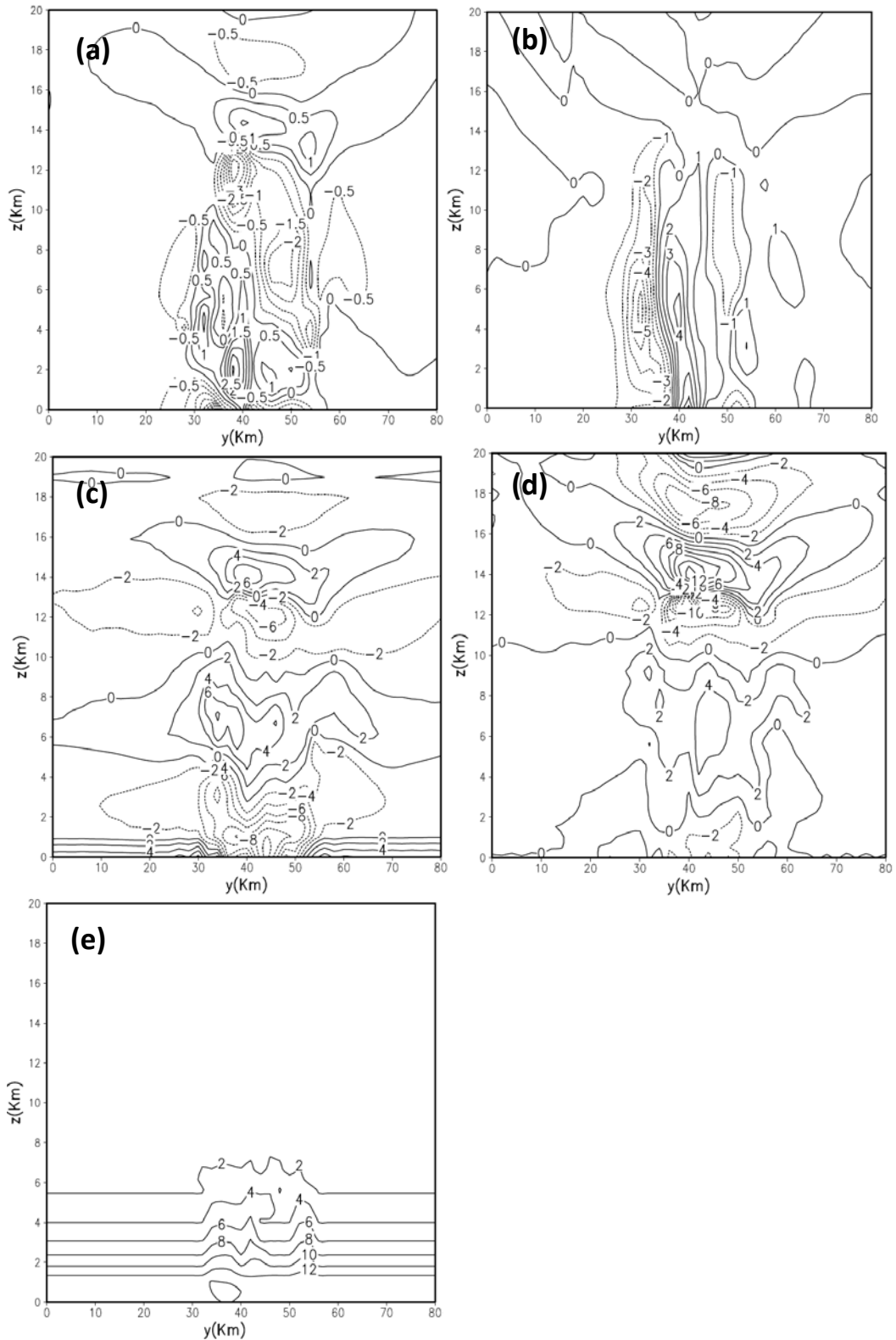


圖 4.2 實驗 1 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；
 (c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times \text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，
 等值線間距為 2 度，單位為 K；(e) 水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg 。

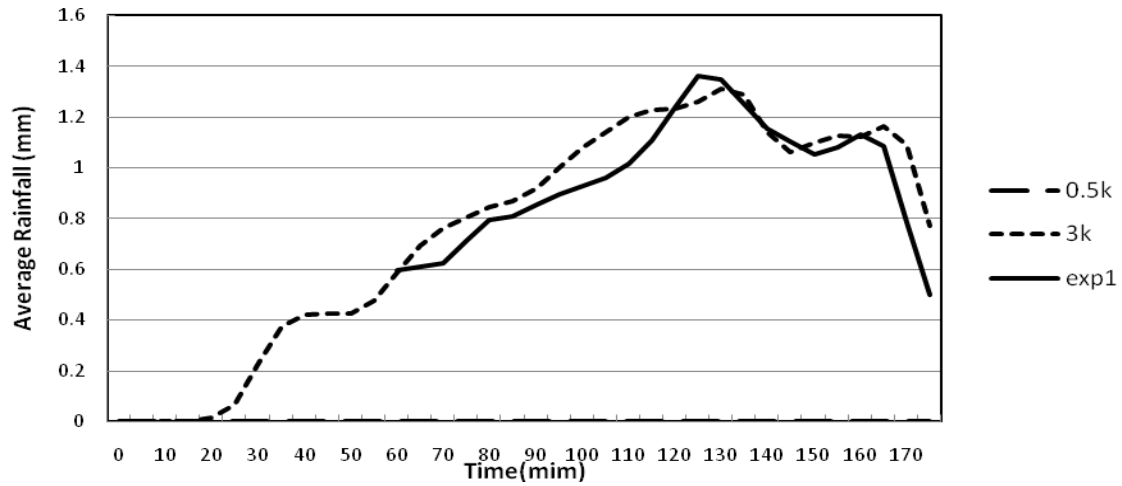


圖 4.3.a 實驗 1、「natural run」平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。長虛線為無同化實驗；虛線為 natural run；實線為實驗 1 結果。

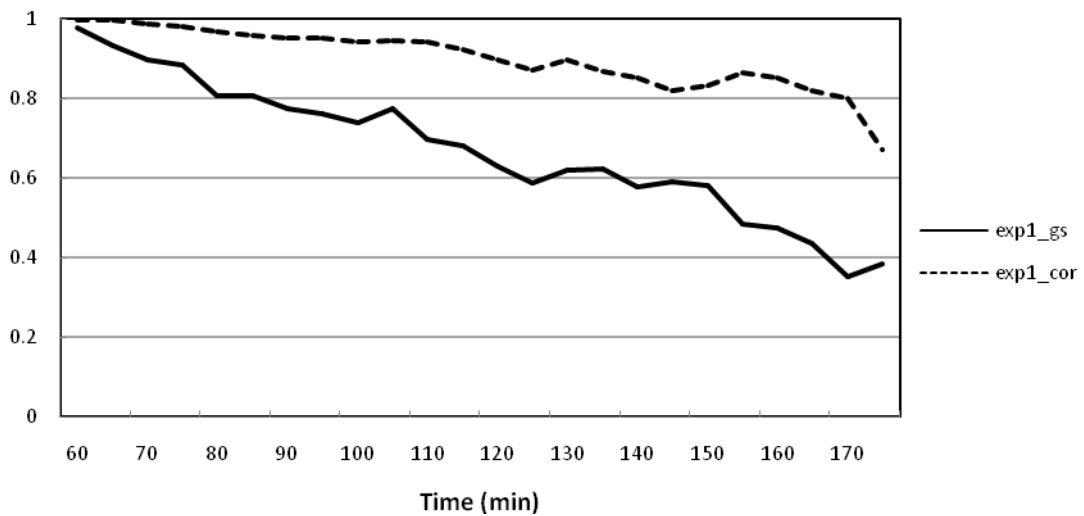


圖 4.3.b 實驗 1 和「natural run」五分鐘累積降雨量相關性(虛線)、「GS」得分(實線)隨時間變化圖隨時間變化。

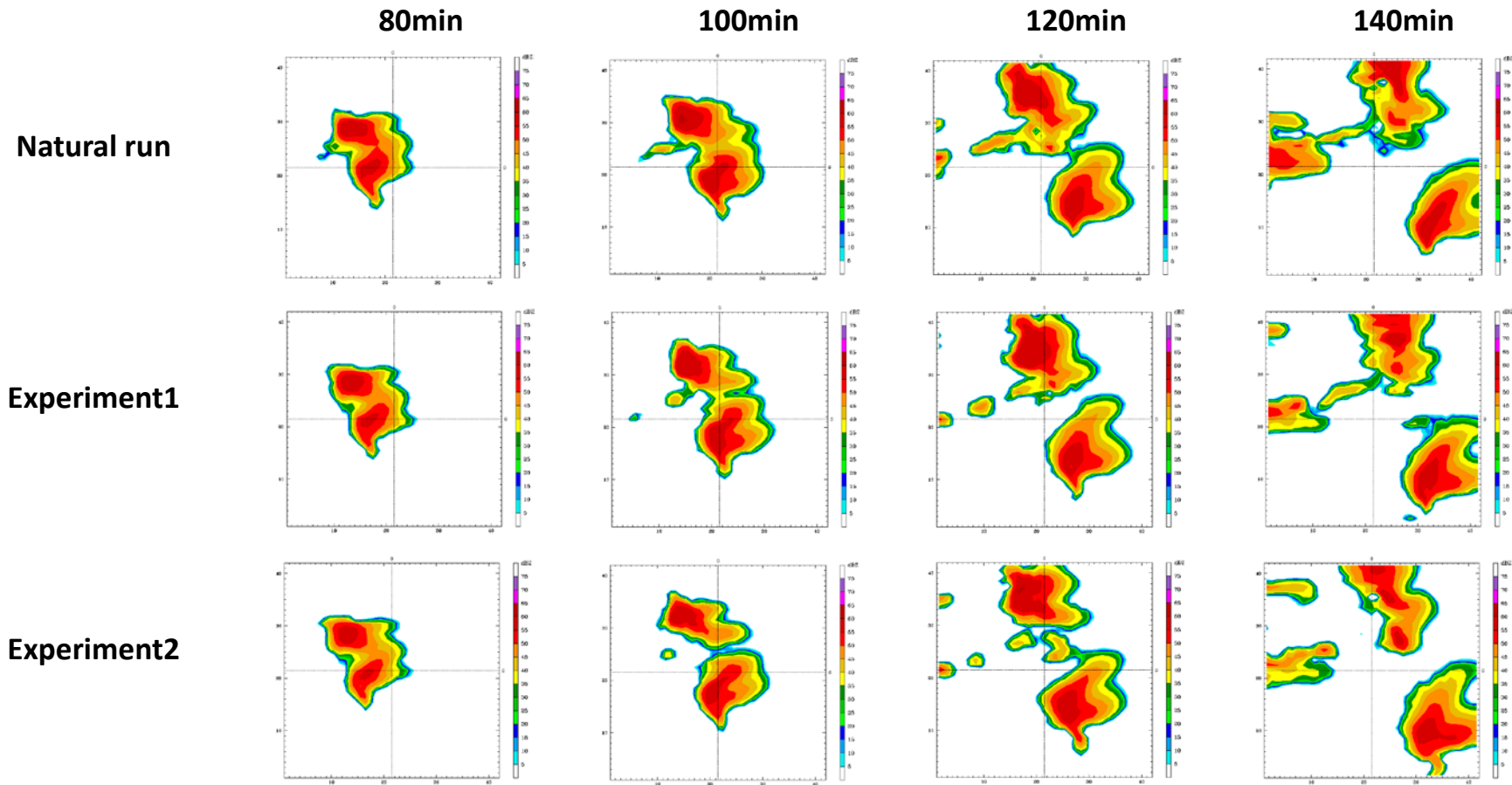


圖 4.4 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為「natural run」、實驗 1 及實驗 2。

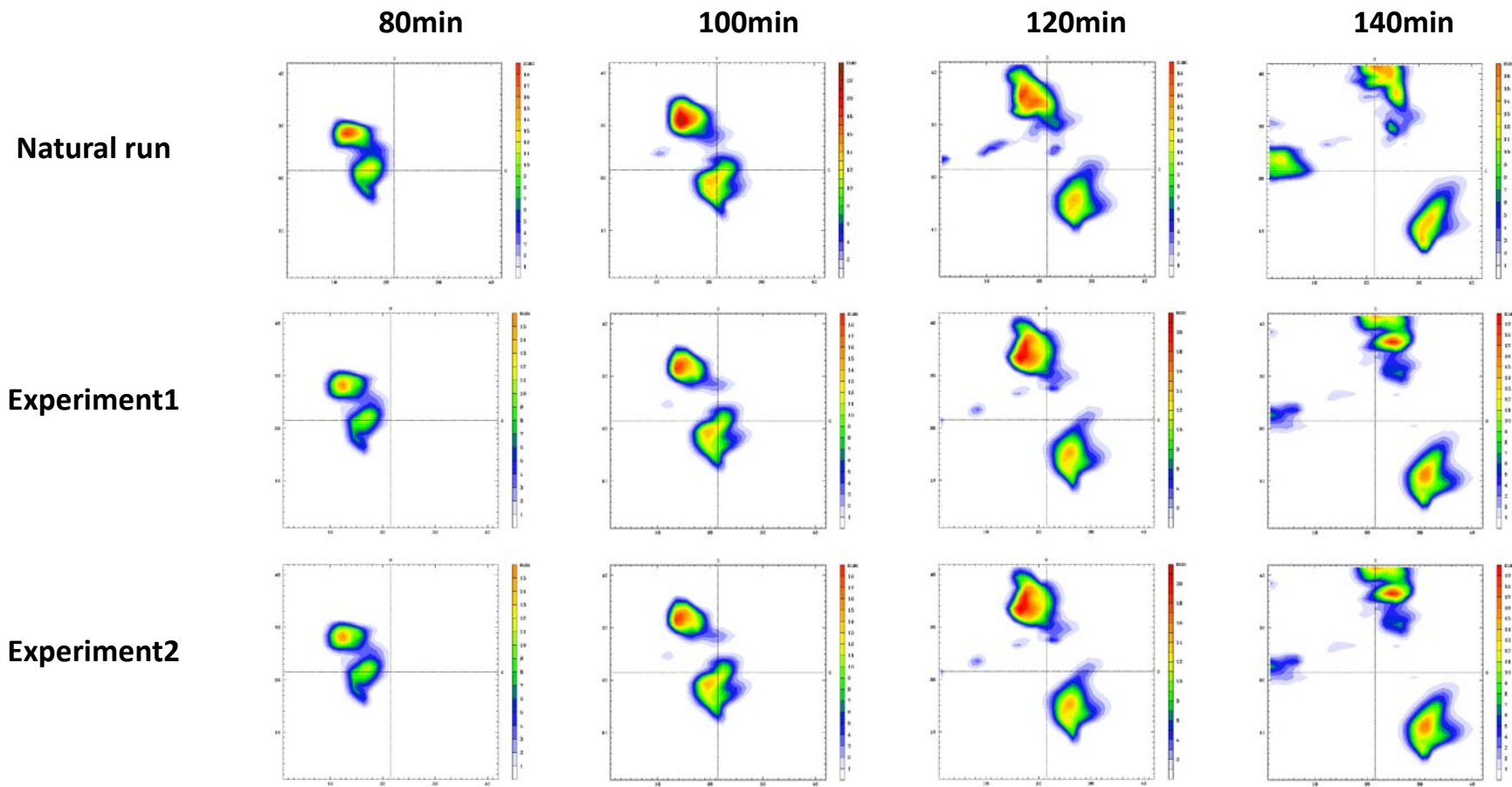


圖 4.5 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的雨量場。由上而下依次為「natural run」、實驗 1 及實驗 2。

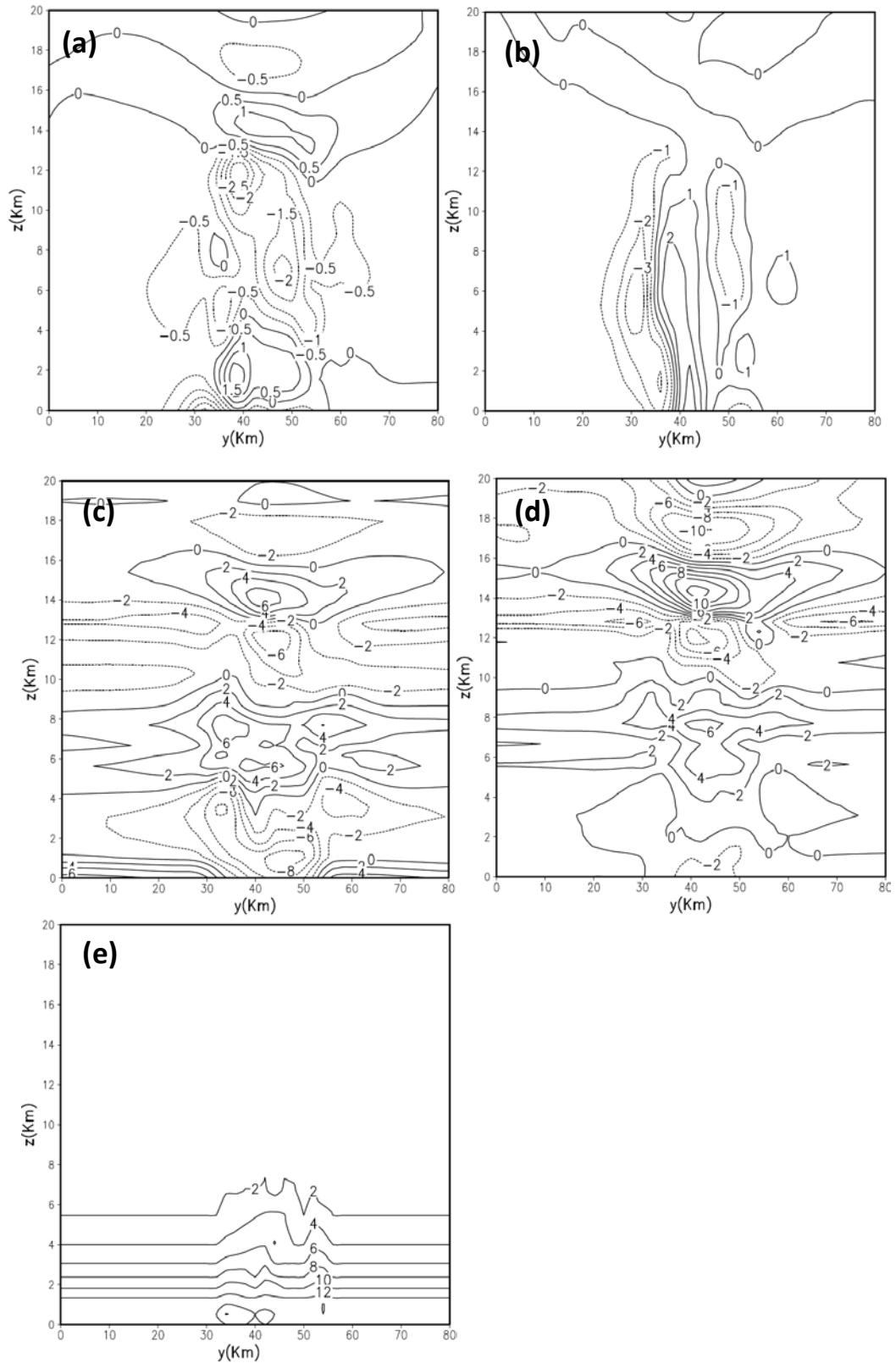


圖 4.6 實驗 2 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K ；(e) 水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg 。

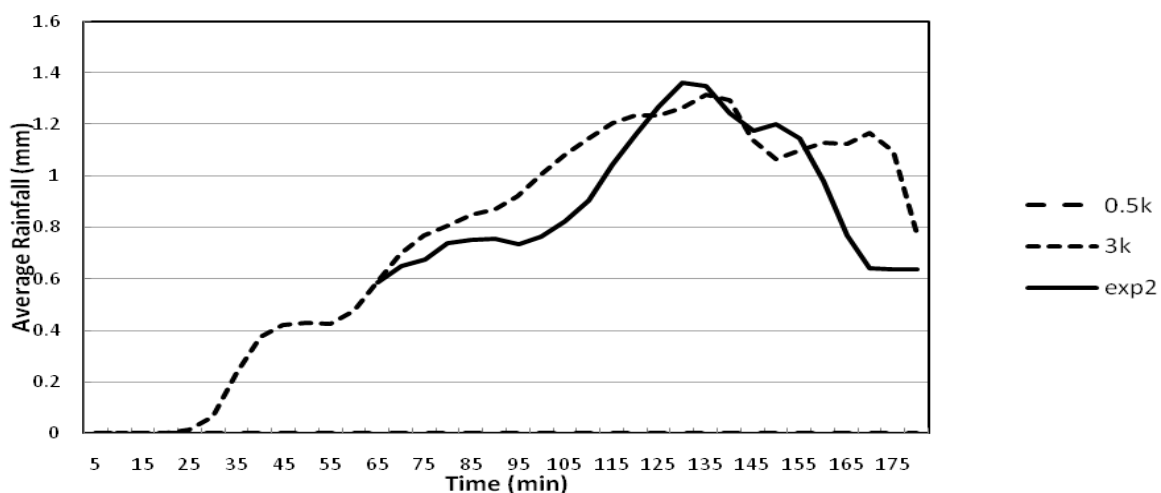


圖 4.7.a 實驗 2、「natural run」平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。長虛線為無同化實驗；虛線為 natural run；實線為實驗 2 結果。

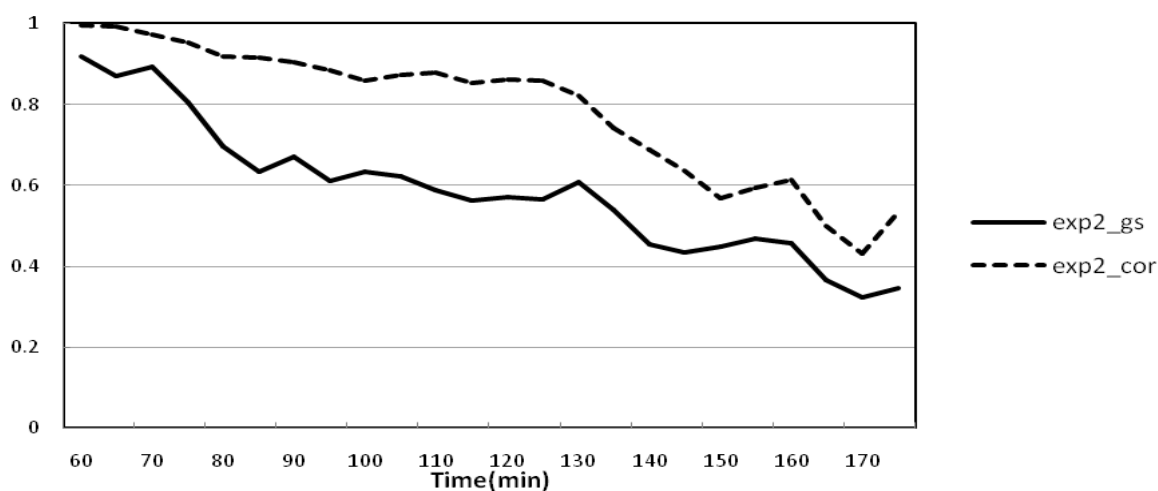


圖 4.7.b 實驗 2 和「natural run」五分鐘累積降雨量相關性(虛線)、「GS」得分(實線)隨時間變化圖。

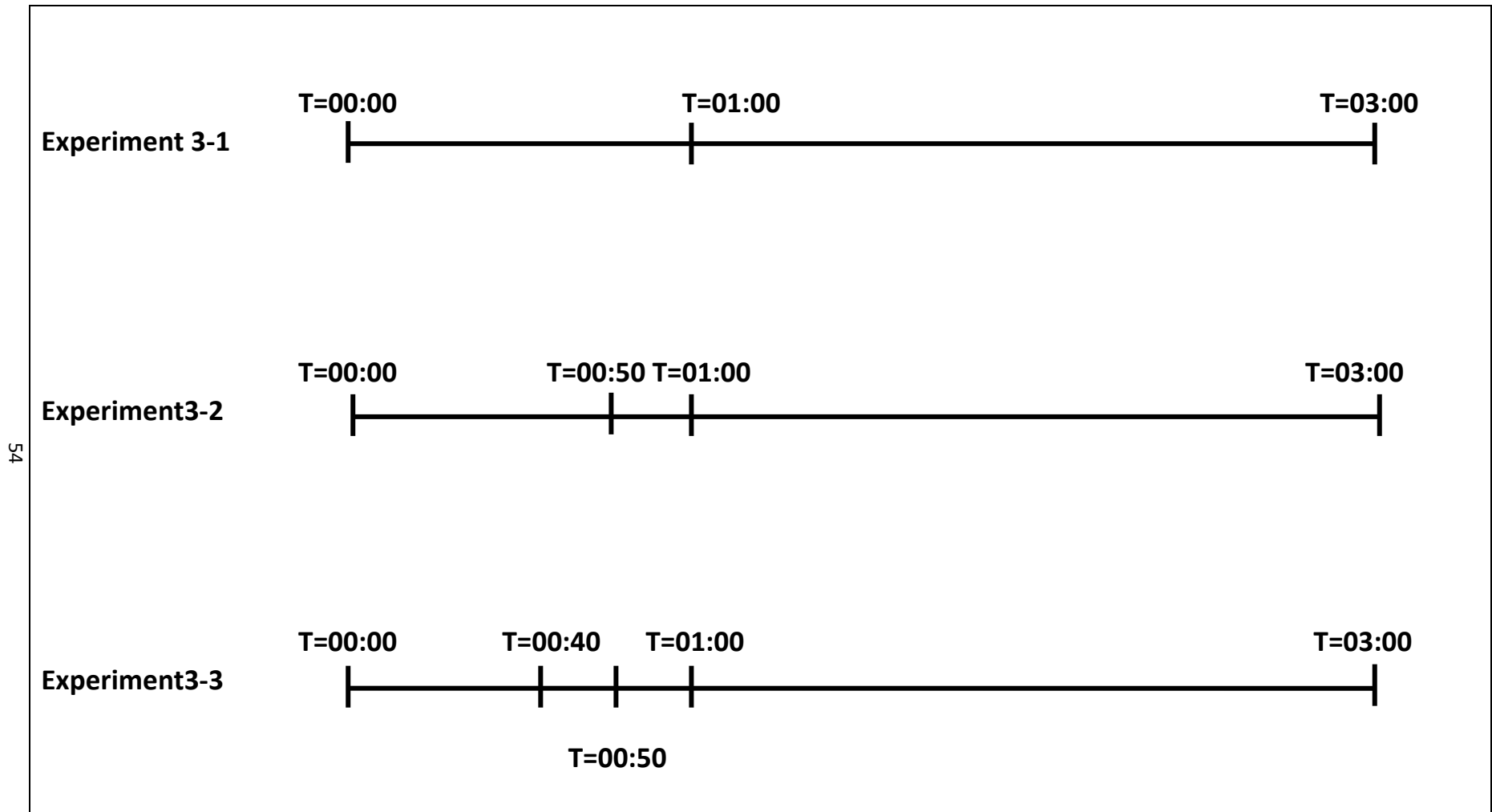


圖 4.8 實驗 3：「同化次數」測試實驗流程圖。實驗 3-1：於模擬時間 01:00 進行 1 次同化的實驗；實驗 3-2：於模擬時間 00:50 及 01:00 時，分別進行 2 次同化的實驗；實驗 3-3：於模式模擬到 00:40、00:50 及 01:00 時同化三次的實驗

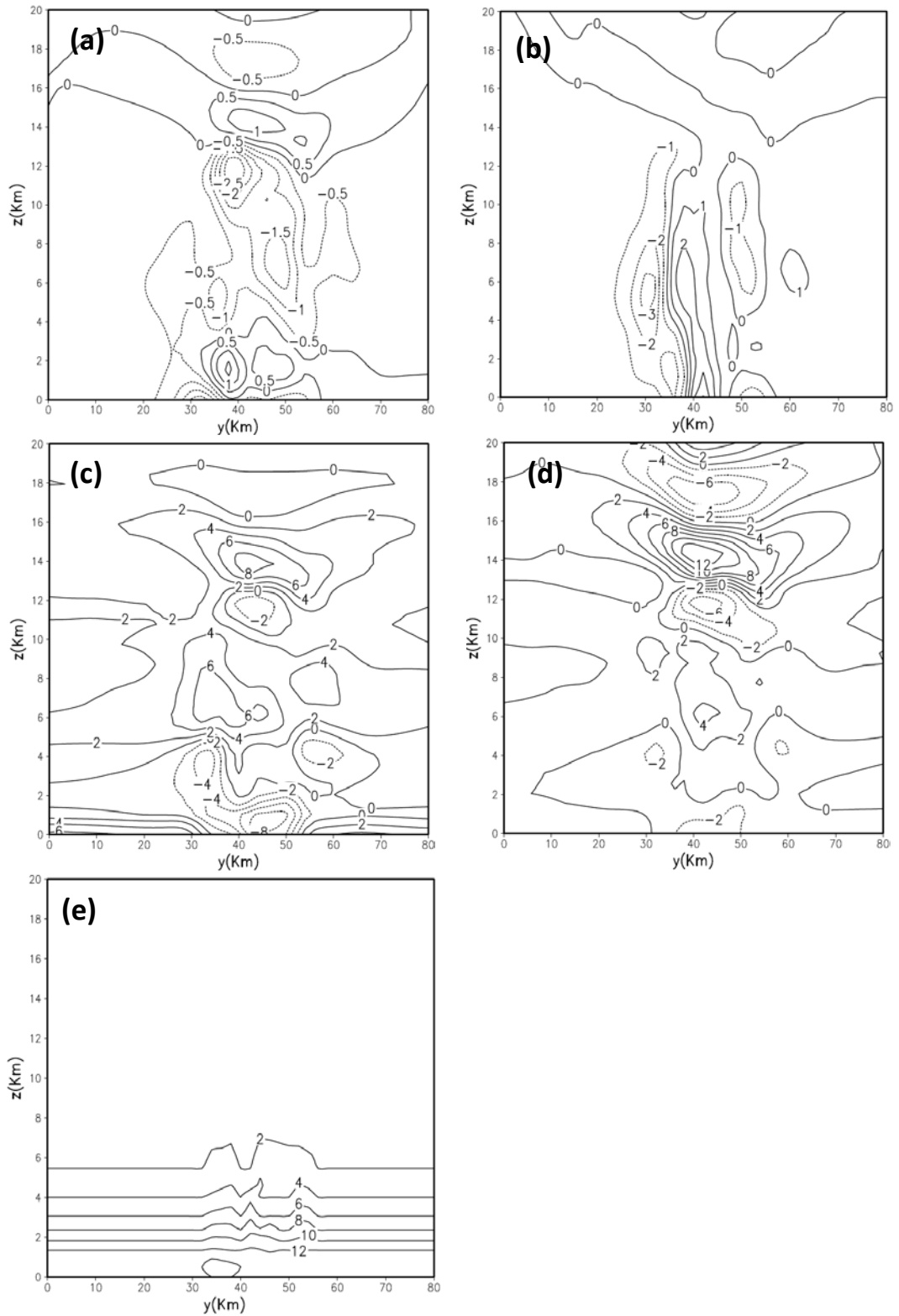


圖 4.9 實驗 3-1 於同化結束 (01:00) 時, 沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度, 等值線間距為 0.5; (b). y 方向氣壓梯度, 等值線間距為 1;
 (c). z 方向氣壓梯度, 等值線間距為 2, 氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場,
 等值線間距為 2 度, 單位為 K; (e) 水汽混合比, 等值線間距為 2, 單位為 g/kg 。

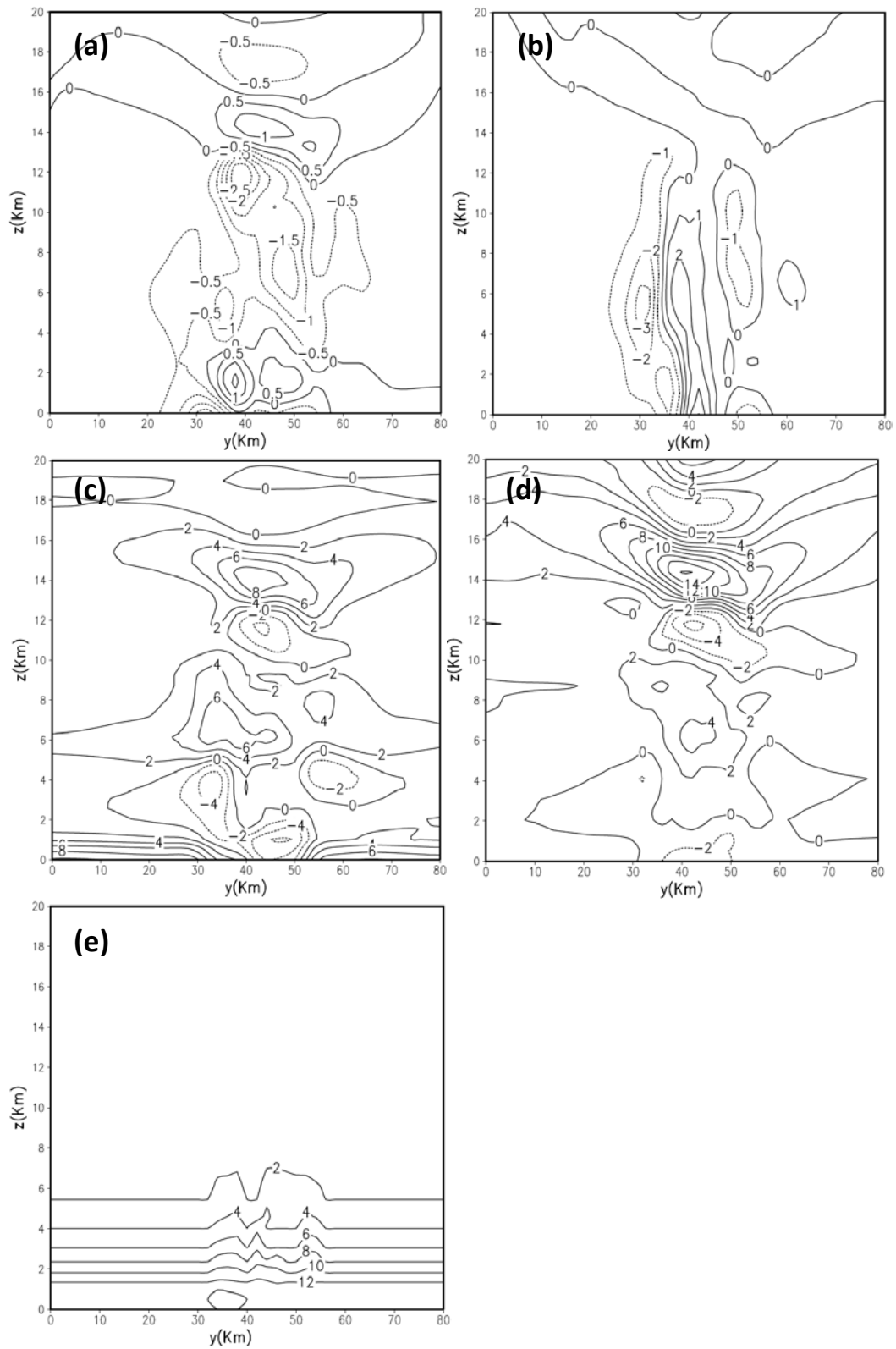


圖 4.10 實驗 3-2 於同化結束(01:00)時,沿 $x=15\text{ km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度,等值線間距為 0.5; (b). y 方向氣壓梯度,等值線間距為 1;
 (c). z 方向氣壓梯度,等值線間距為 2,氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場,
 等值線間距為 2 度,單位為 K; (e)水汽混合比,等值線間距為 2,單位為 g/kg 。

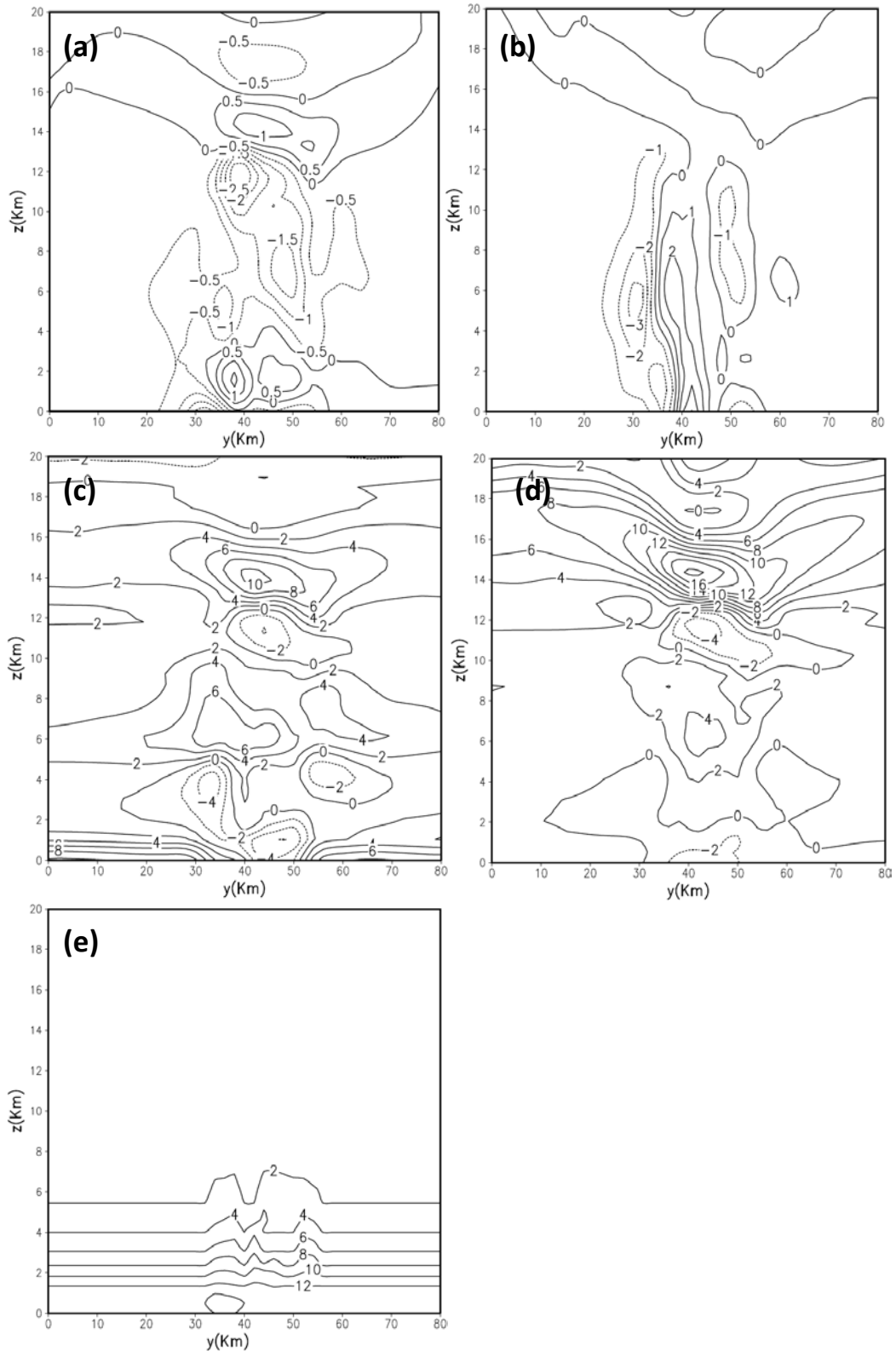


圖 4.11 實驗 3-3 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 100xPa 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e) 水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg 。

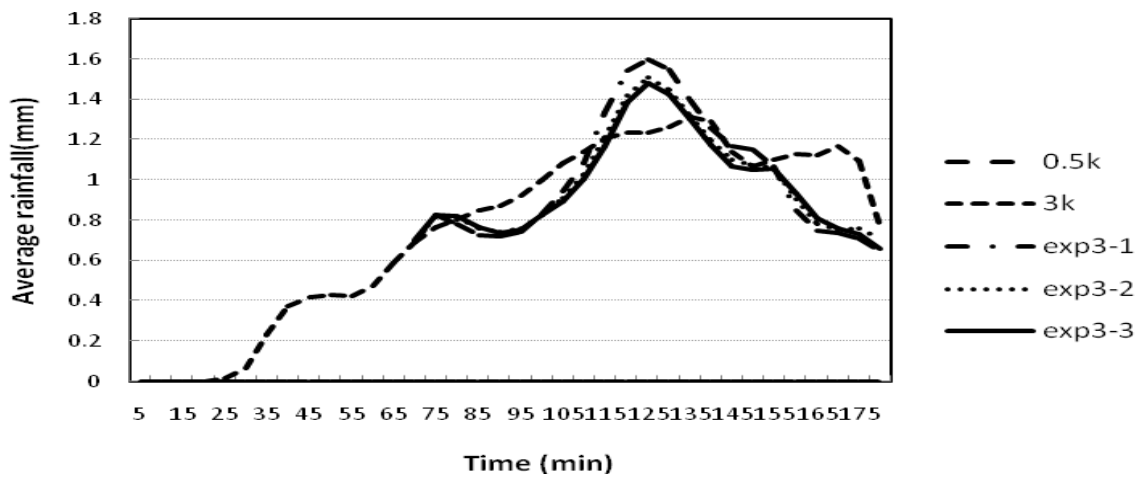


圖 4.12. a 實驗 3-1(虛點線)、3-2(點線)、3-3(實線)、「natural run」(虛線)平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。

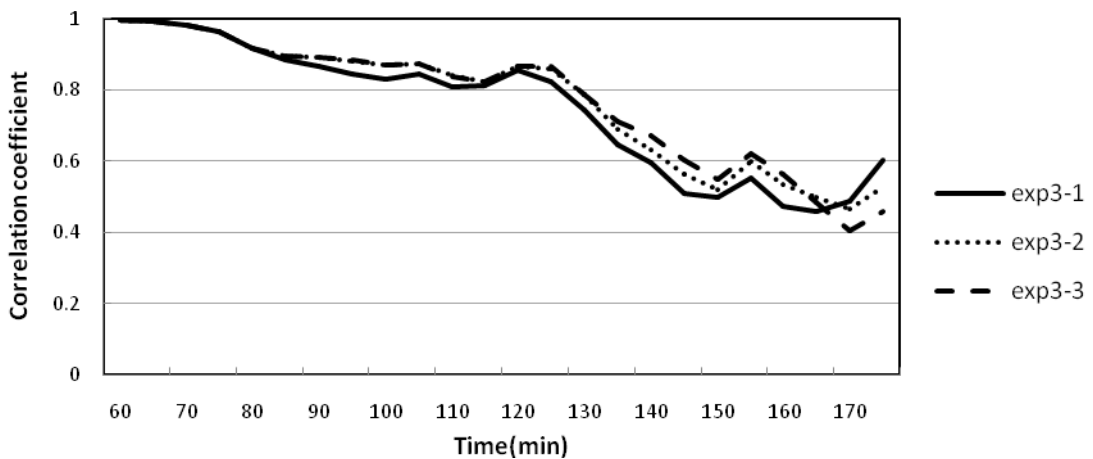


圖 4.12. b 實驗 3-1(實線)、3-2(點線)、3-3(虛線)分別與「natural run」五分鐘累積降雨量相關性，隨時間變化圖。

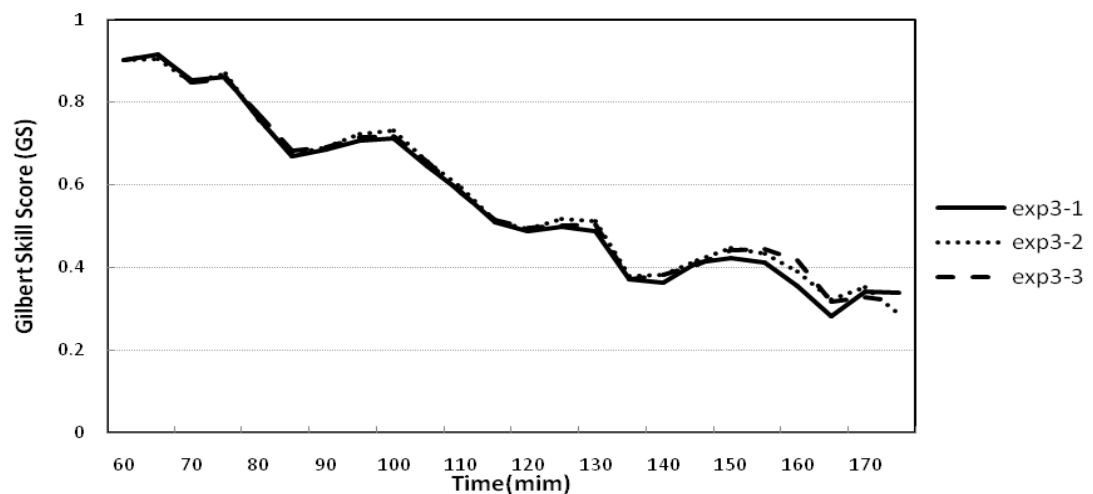


圖 4.12. c 實驗 3-1(實線)、3-2(點線)、3-3(虛線)「GS」得分隨時間變化圖。

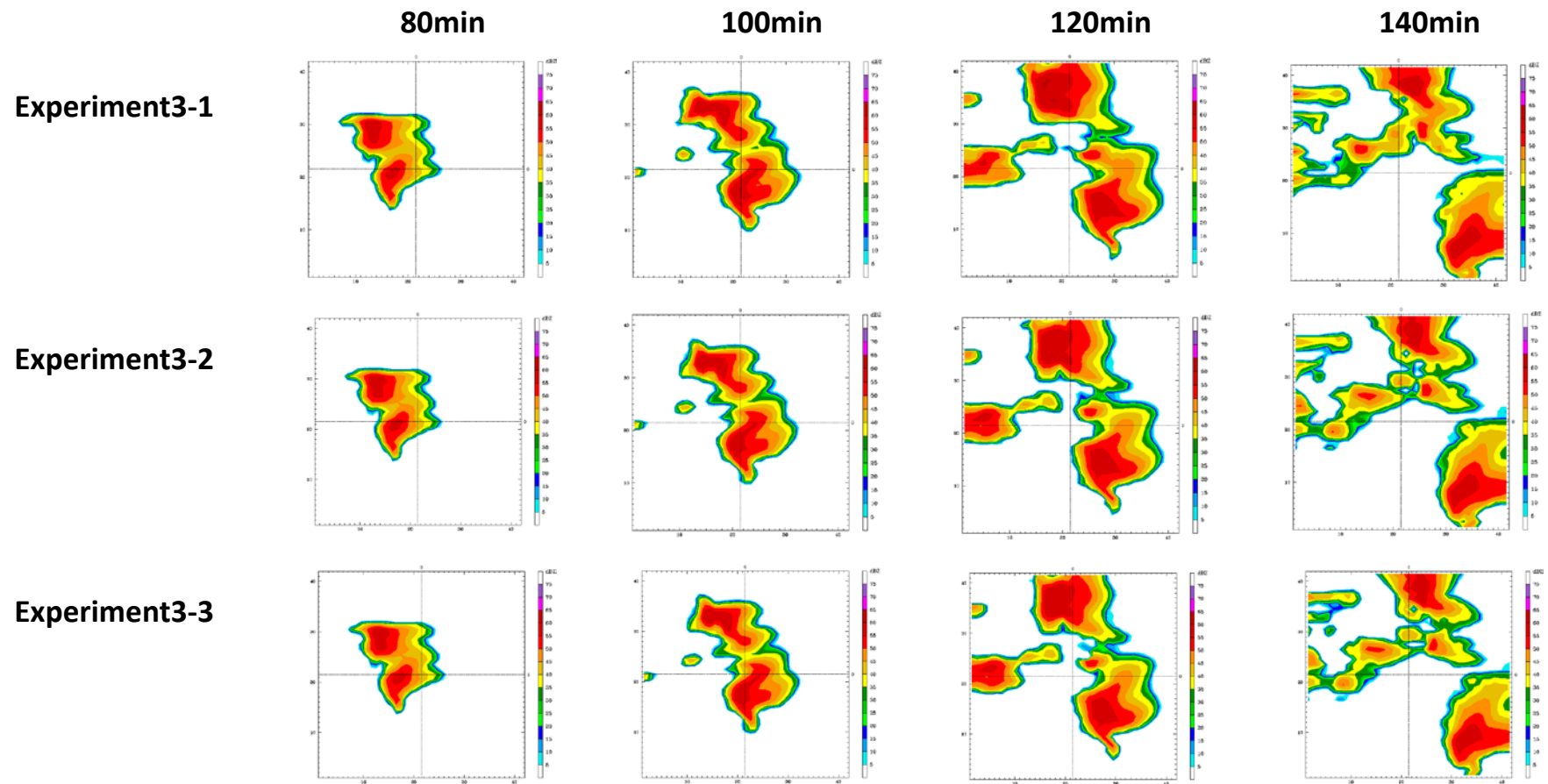


圖 4.13 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為實驗 3-1、3-2、3-3。

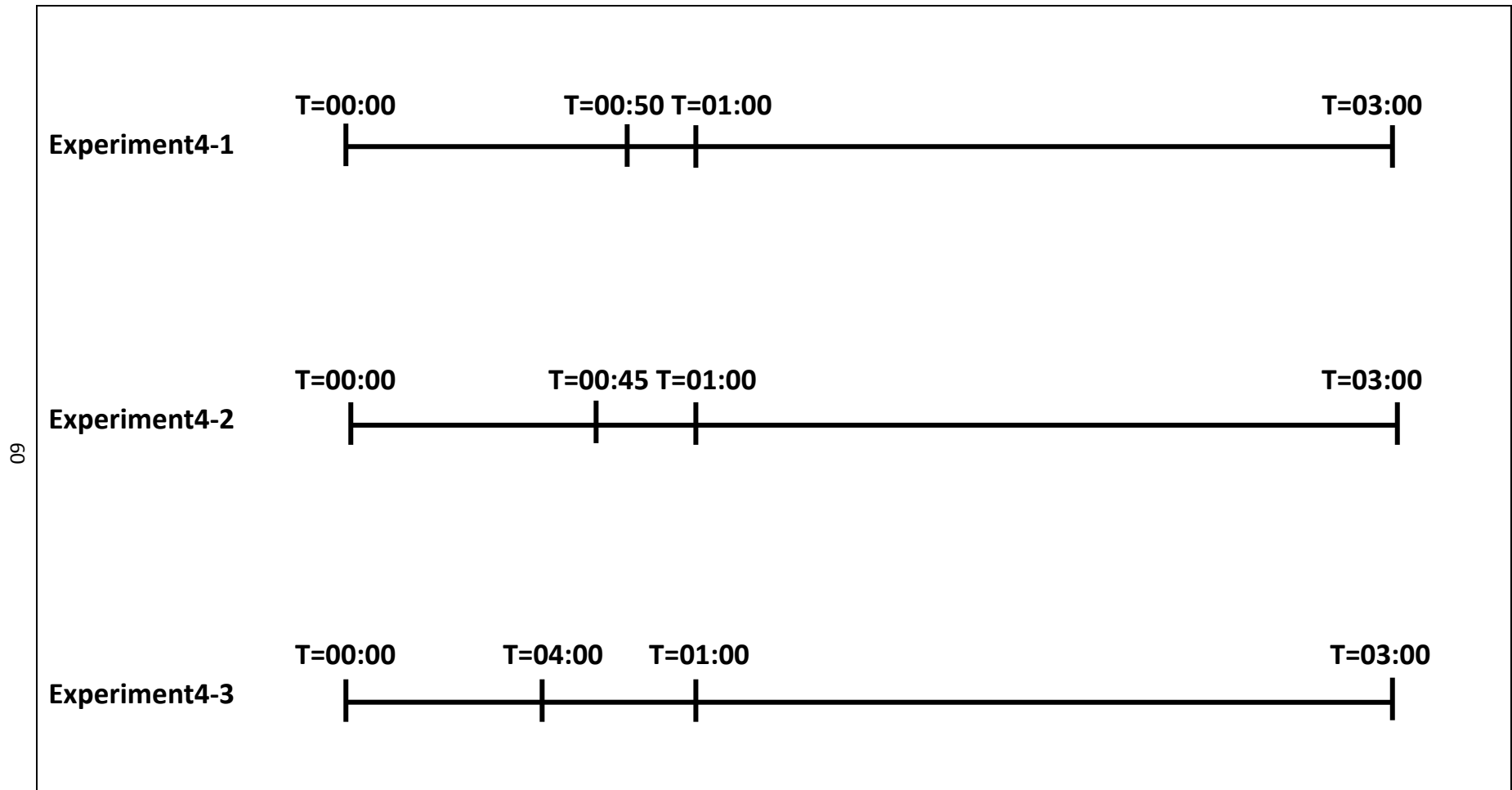


圖 4.14 實驗 4：「同化時間間距」測試實驗流程圖。實驗 4-1：於模擬時間 00：50、01：00 進行同化時間間距 10 分鐘的實驗；實驗 4-2：於模擬時間 00：45、01：00 進行同化時間間距 15 分鐘的實驗；實驗 4-3：於模擬時間 00：40、01：00 進行同化時間間距 20 分鐘的實驗。

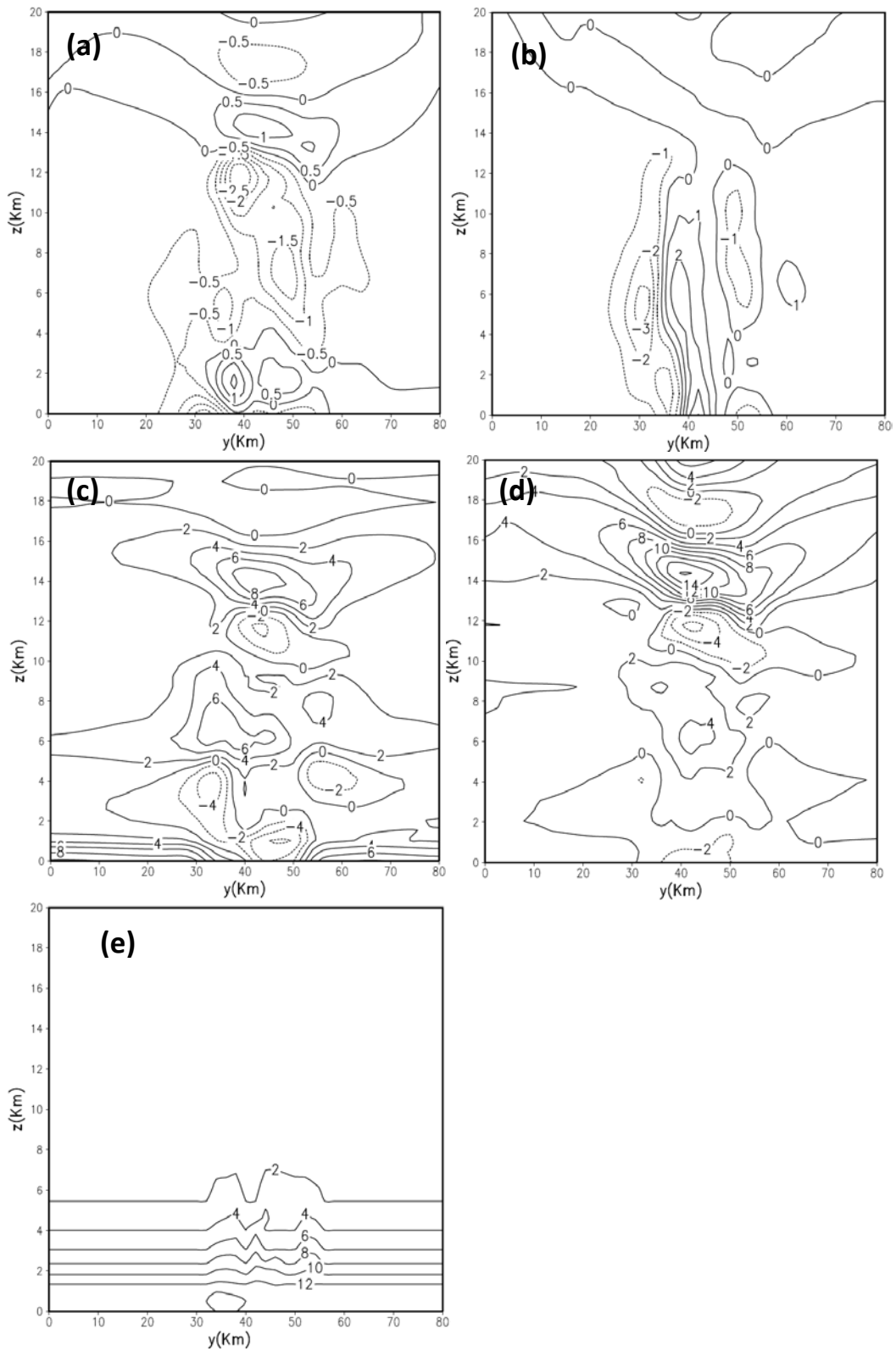


圖 4.15 實驗 4-1 於同化結束(01:00)時,沿 $x=15\text{ km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度,等值線間距為 0.5; (b). y 方向氣壓梯度,等值線間距為 1;
 (c). z 方向氣壓梯度,等值線間距為 2,氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場,
 等值線間距為 2 度,單位為 K; (e)水汽混合比,等值線間距為 2,單位為 g/kg 。

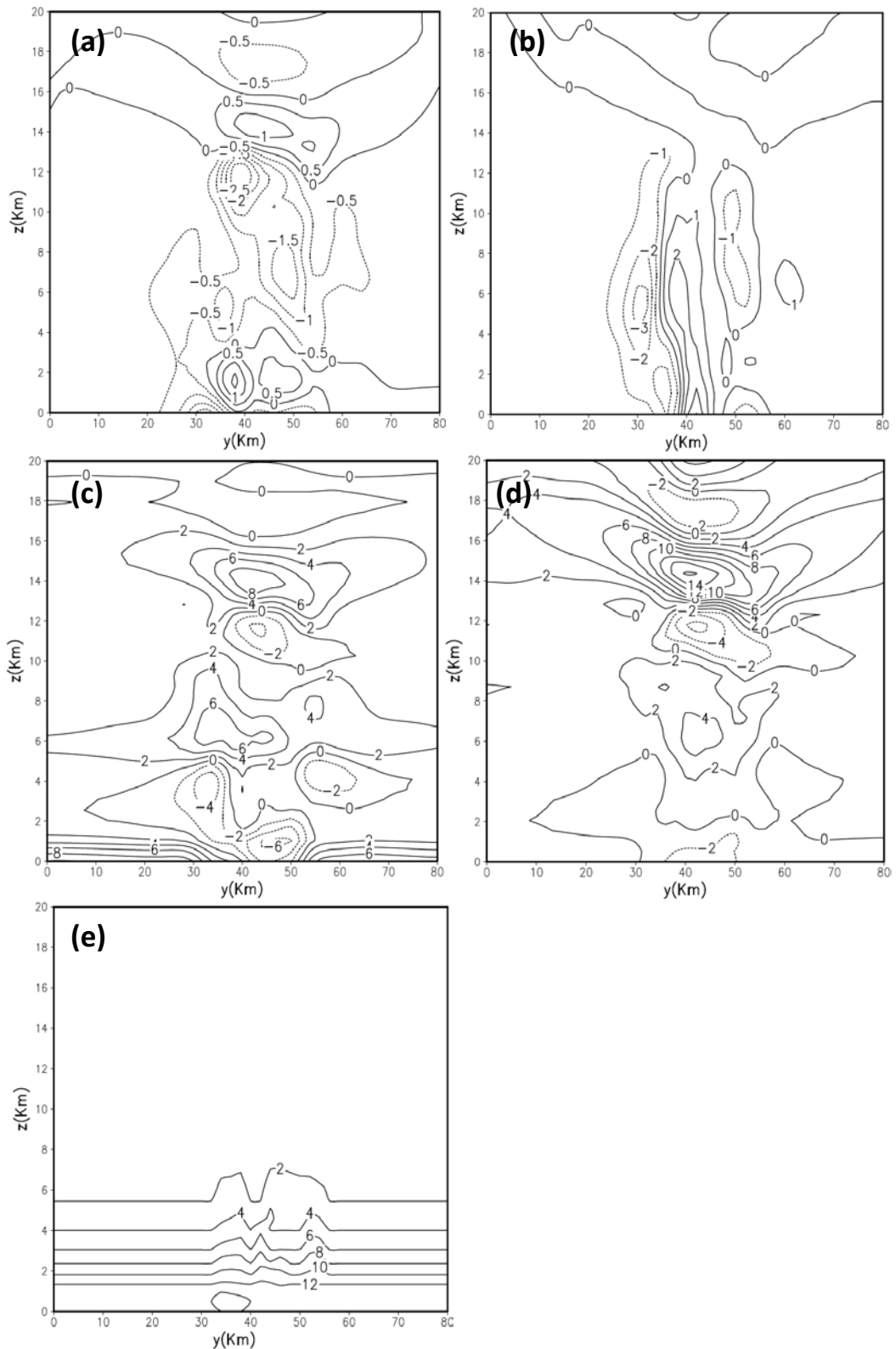


圖 4.16 實驗 4-2 於同化結束 (01:00) 沿 $x=15\text{ km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度, 等值線間距為 0.5; (b). y 方向氣壓梯度, 等值線間距為 1;
 (c). z 方向氣壓梯度, 等值線間距為 2, 氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場,
 等值線間距為 2 度, 單位為 K; (e) 水汽混合比, 等值線間距為 2, 單位為 g/kg 。

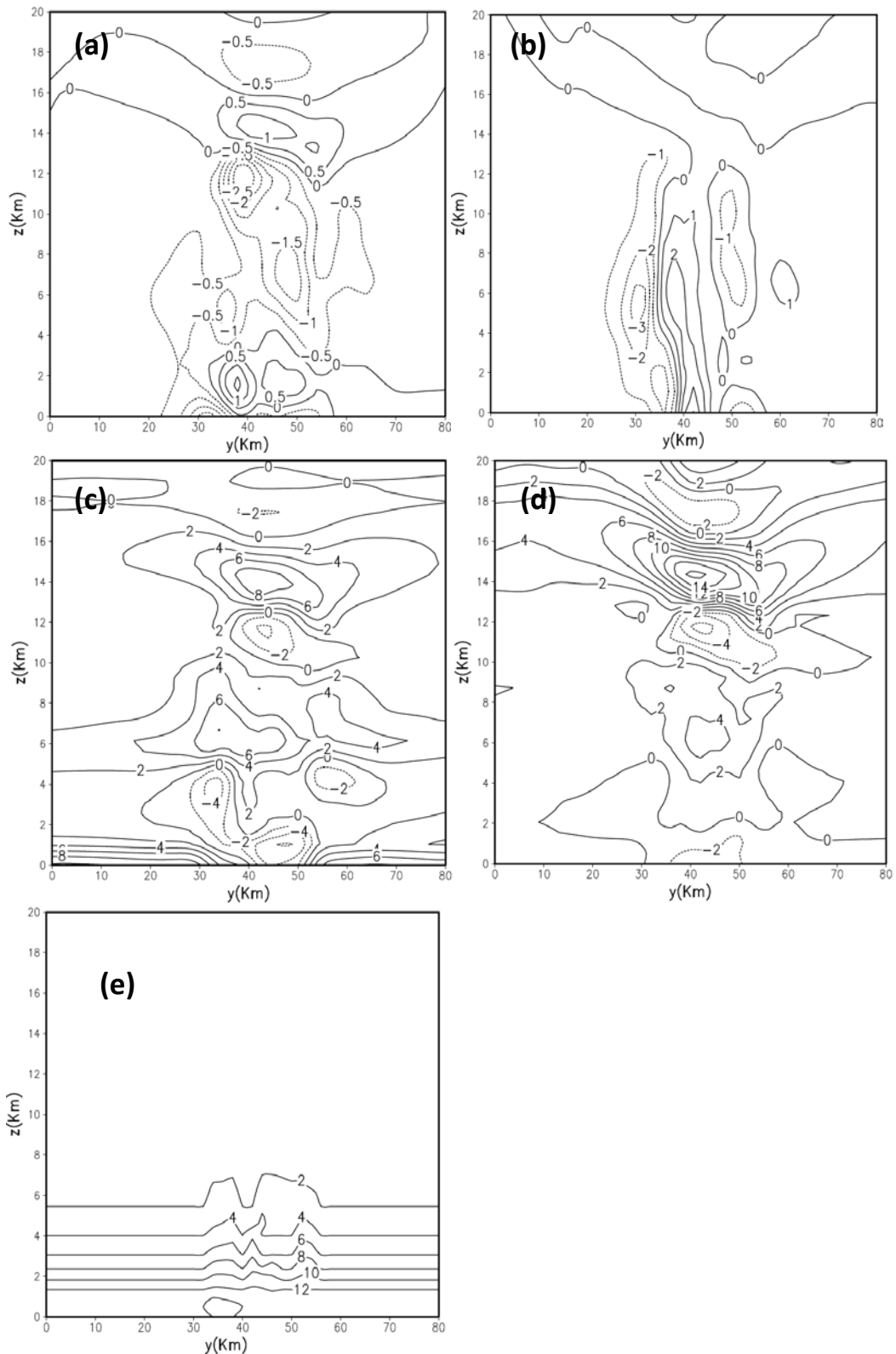


圖 4.17 實驗 4-3 於同化結束 (01:00) 時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；(c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，等值線間距為 2 度，單位為 K；(e) 水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg 。

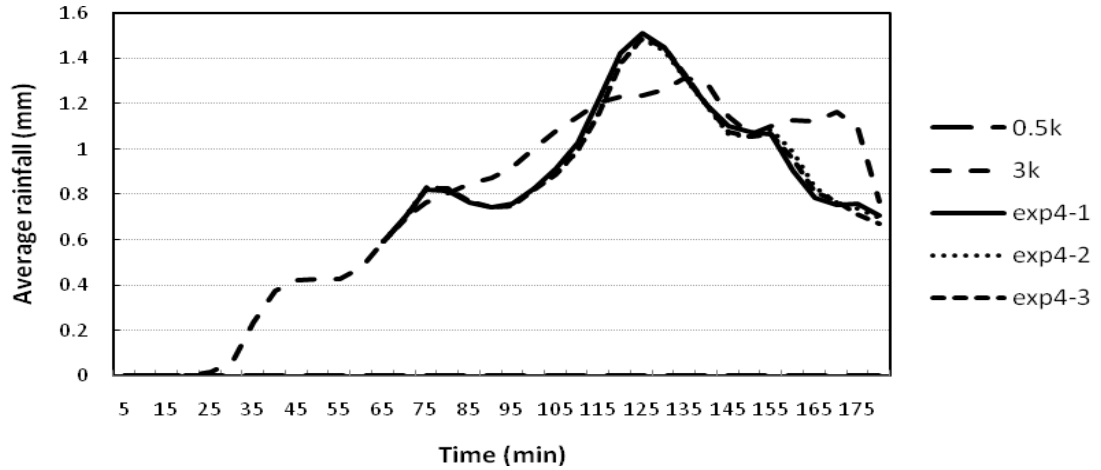


圖 4.18. a 實驗 4-1(實線)、4-2(點線)、4-3(短虛線)、「natural run」(虛線)平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。長虛線為無同化實驗結果。

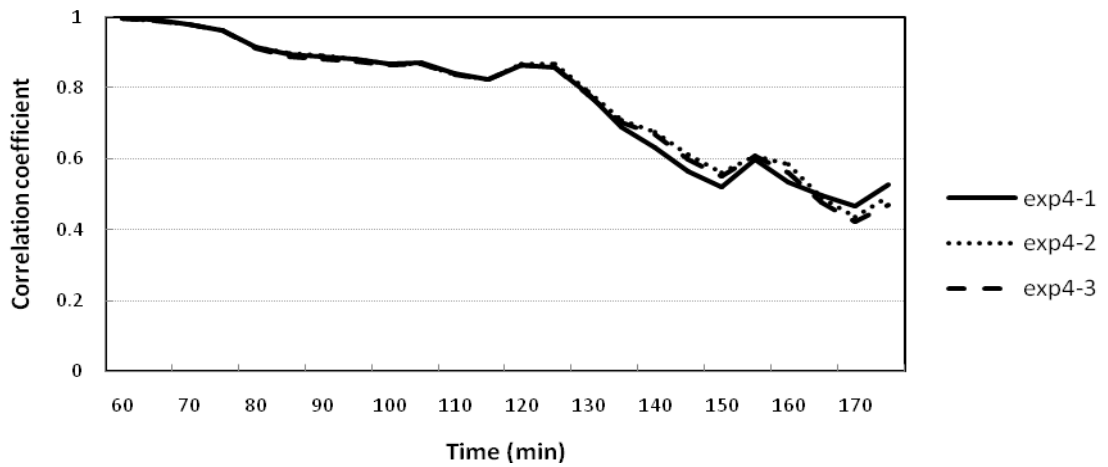


圖 4.18. b 實驗 4-1(實線)、4-2(點線)、4-3(虛線)分別與「natural run」五分鐘累積降雨量相關性，隨時間變化圖。

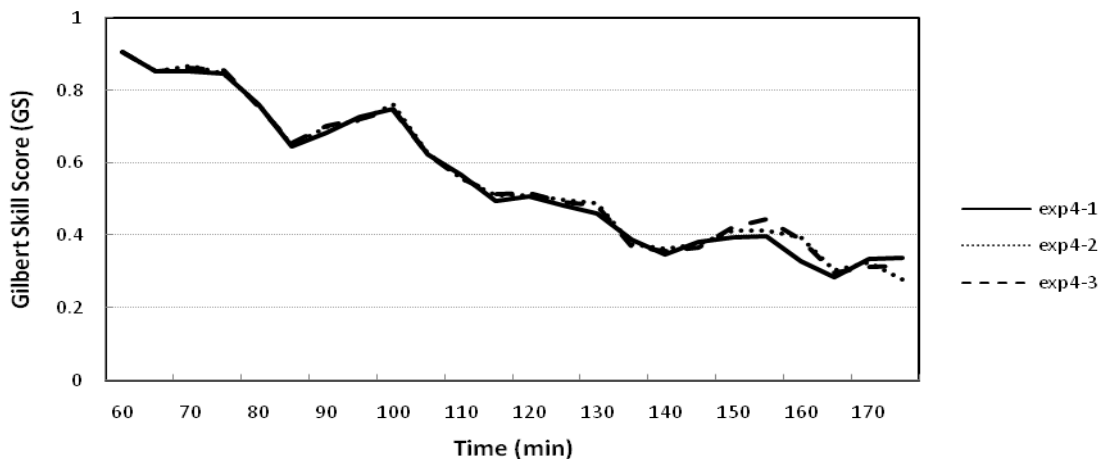


圖 4.18. c 實驗 4-1(實線)、4-2(點線)、4-3(虛線)「GS」得分隨時間變化圖。

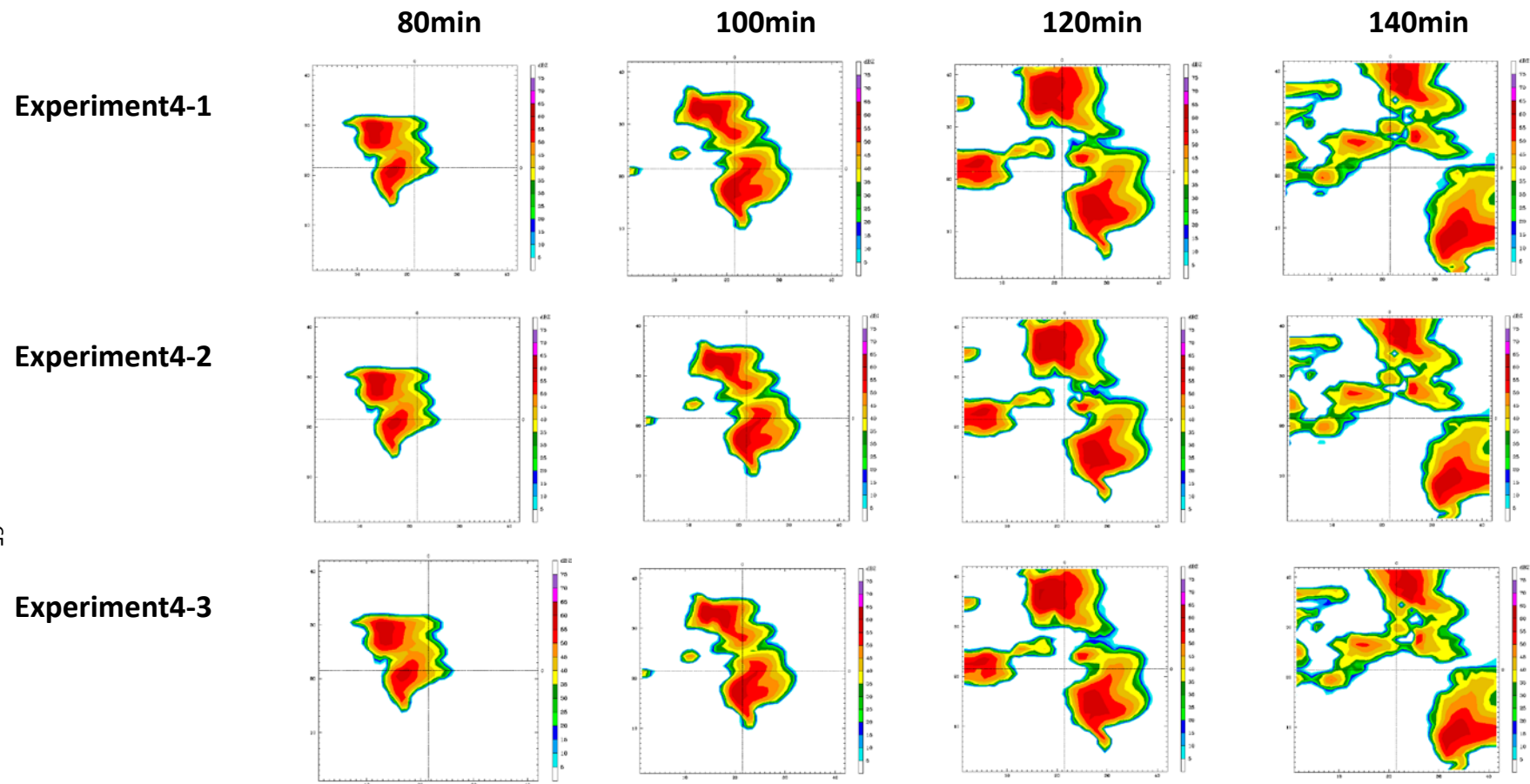


圖 4.19 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為實驗 4-1、4-2、4-3。

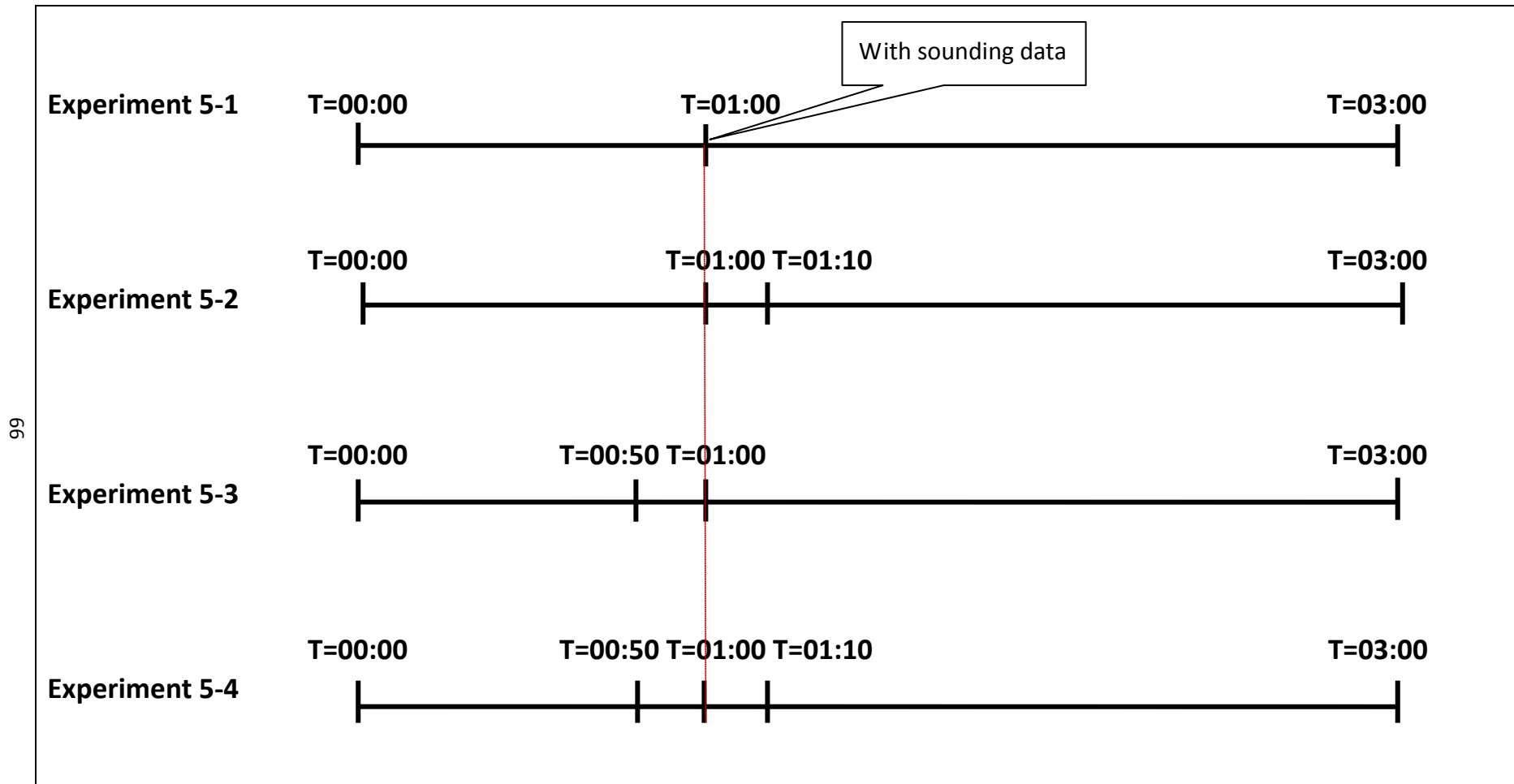


圖 4.20 實驗 5：「探空資料影響」測試實驗流程圖。實驗 5-1、5-2、5-3 及 5-4 都於 01:00 時，進行一次有探空資料的同化。實驗 5-1 只同化一次；實驗 5-2、5-3 分別於 01:10、00:50，進行另一次無探空資料的同化；實驗 5-4 則是於 00:50、01:00，進行另二次無探空資料的同化。

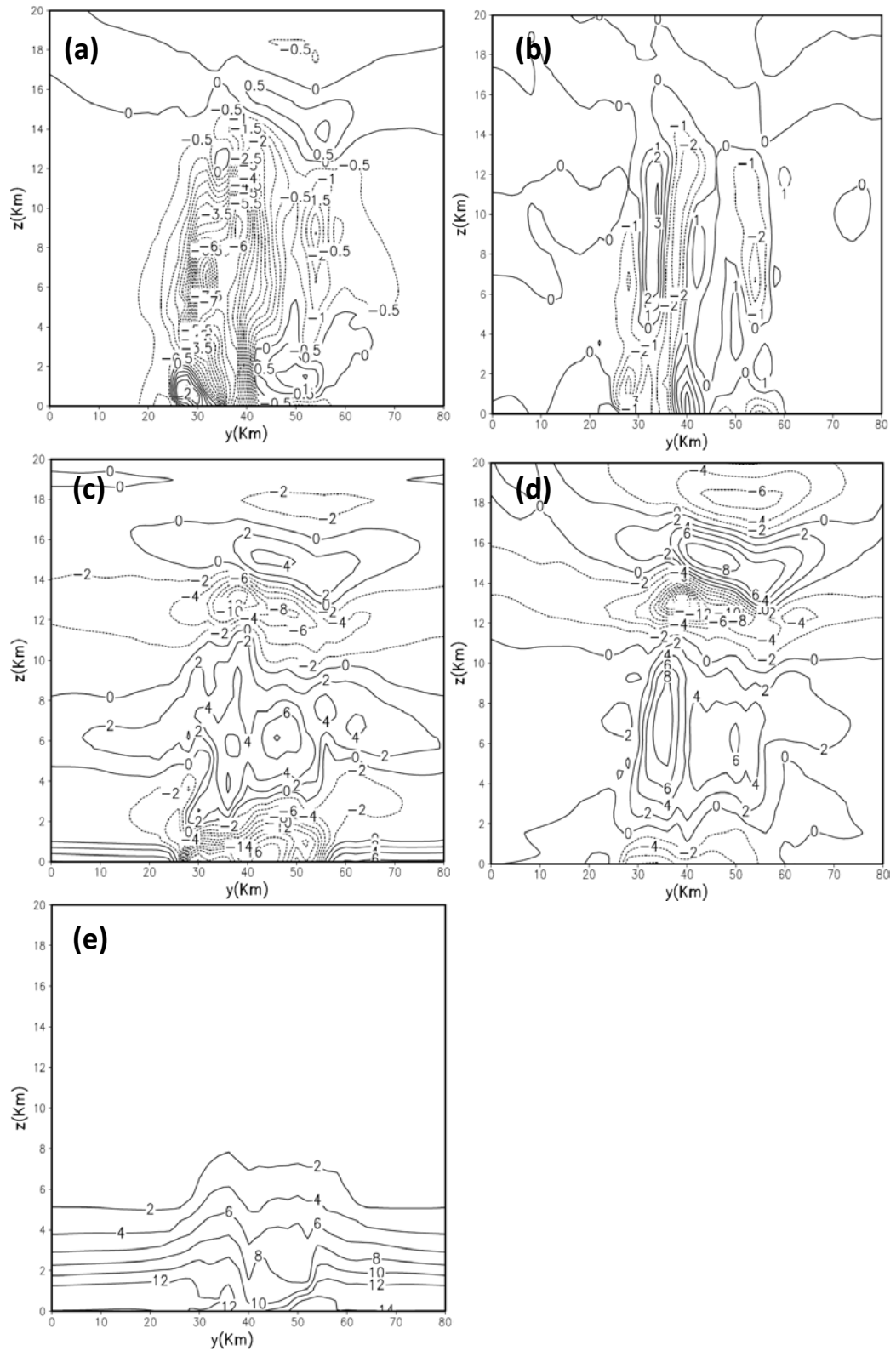


圖 4.21 「natural run」於第 70 分鐘時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；
 (c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times \text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，
 等值線間距為 2 度，單位為 K；(e) 水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg。

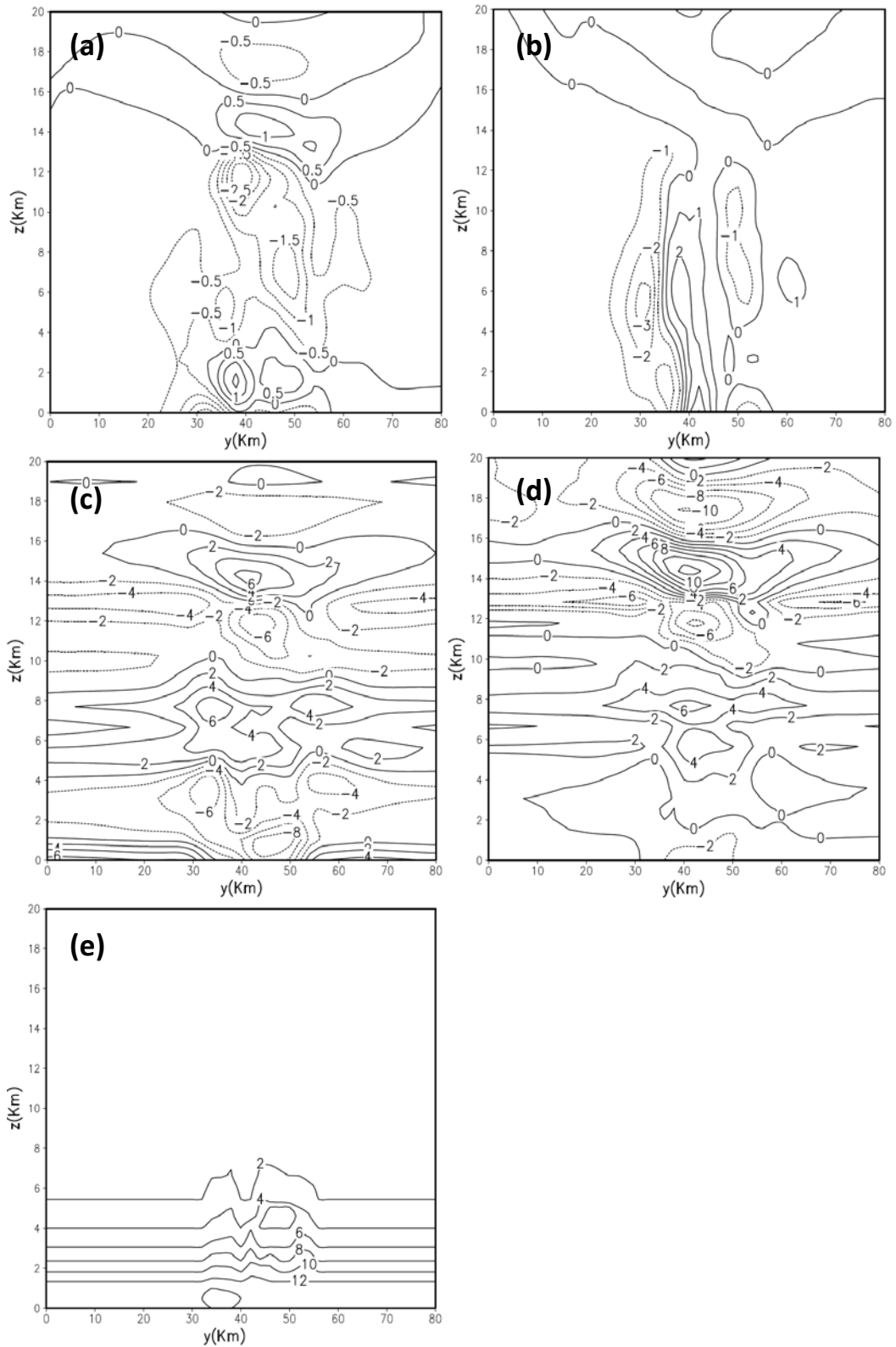


圖 4.22 實驗 5-1 於同化結束(01:00)時,沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度,等值線間距為 0.5; (b). y 方向氣壓梯度,等值線間距為 1;
 (c). z 方向氣壓梯度,等值線間距為 2,氣壓單位為 $100 \times \text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場,
 等值線間距為 2 度,單位為 K; (e)水汽混合比,等值線間距為 2,單位為 g/kg 。

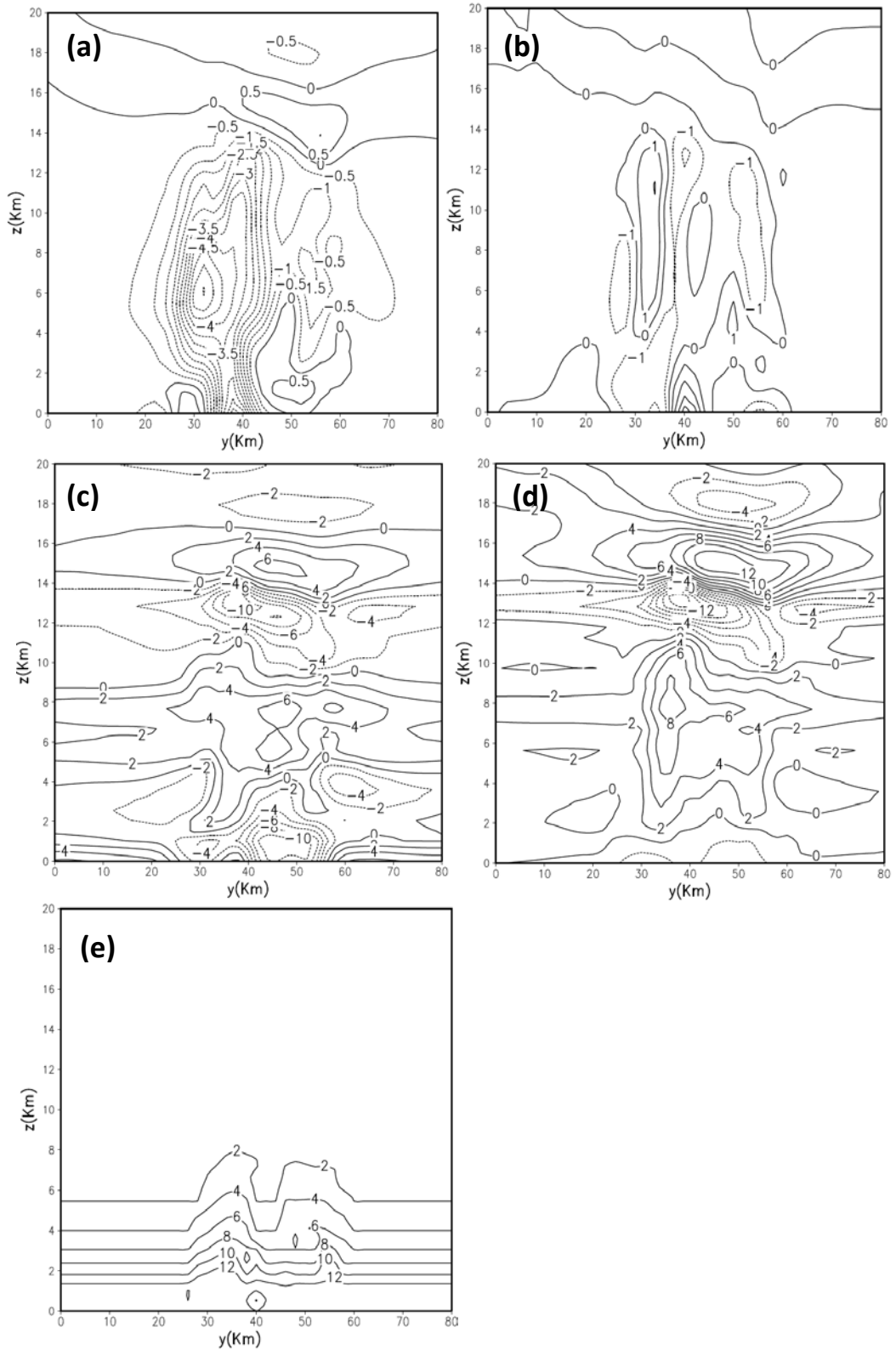


圖 4.23 實驗 5-2 於同化結束(01:10)時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；
 (c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，
 等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg 。

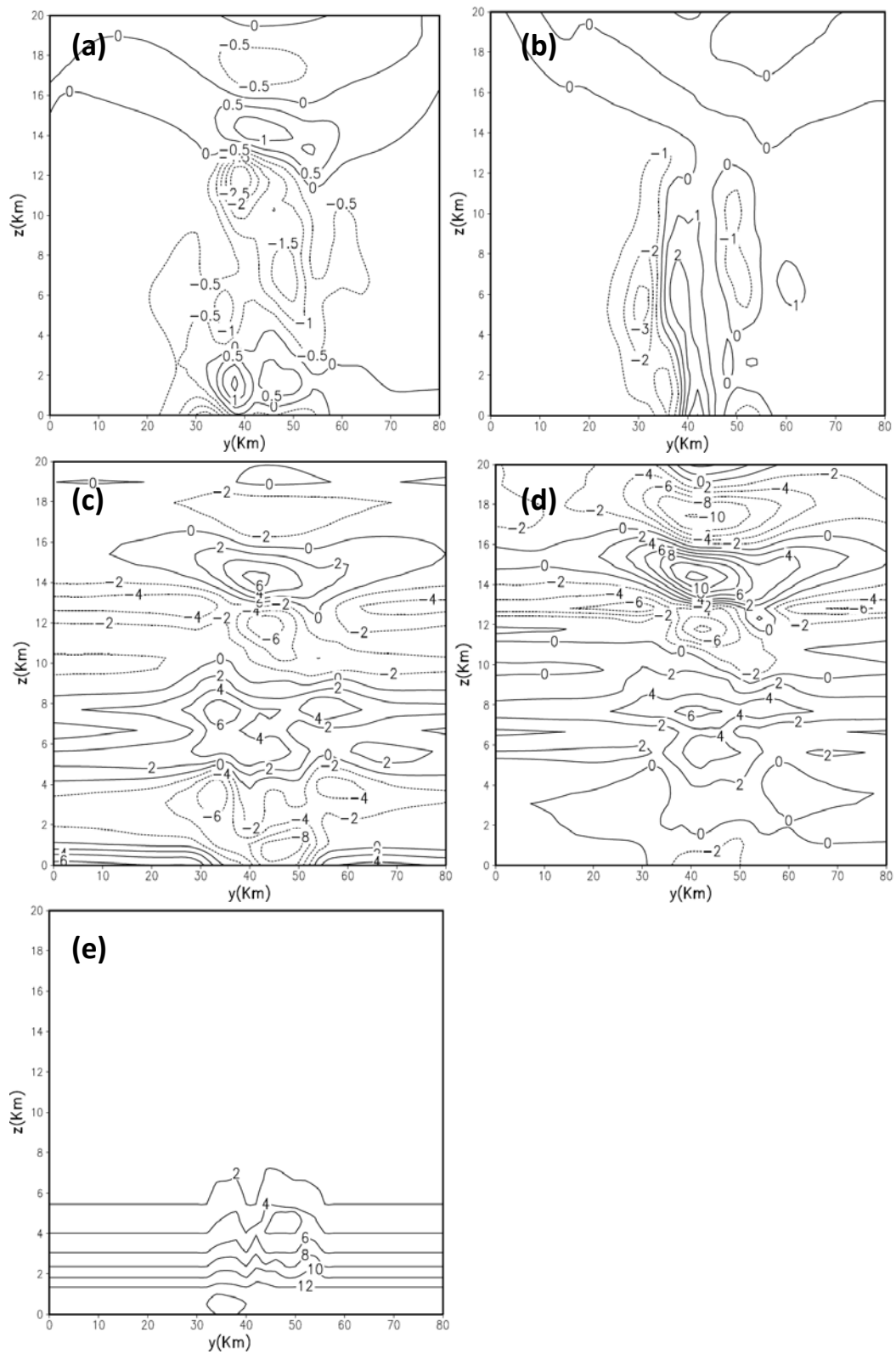


圖 4.24 實驗 5-3 於同化結束(01:00)時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；
 (c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100 \times \text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，
 等值線間距為 2 度，單位為 K；(e) 水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg 。

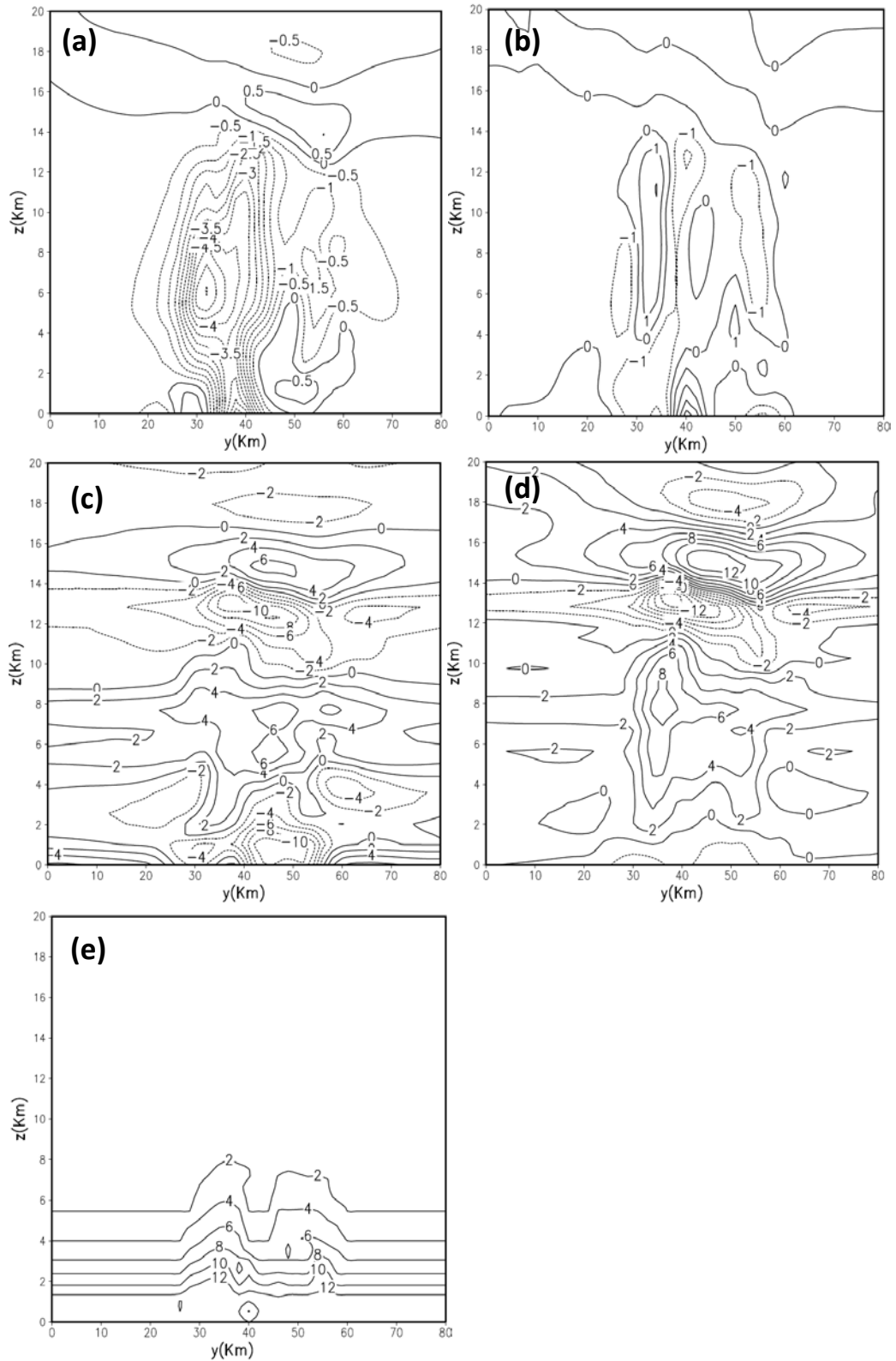


圖 4.25 實驗 5-4 於同化結束(01:10)時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；
 (c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，
 等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg 。

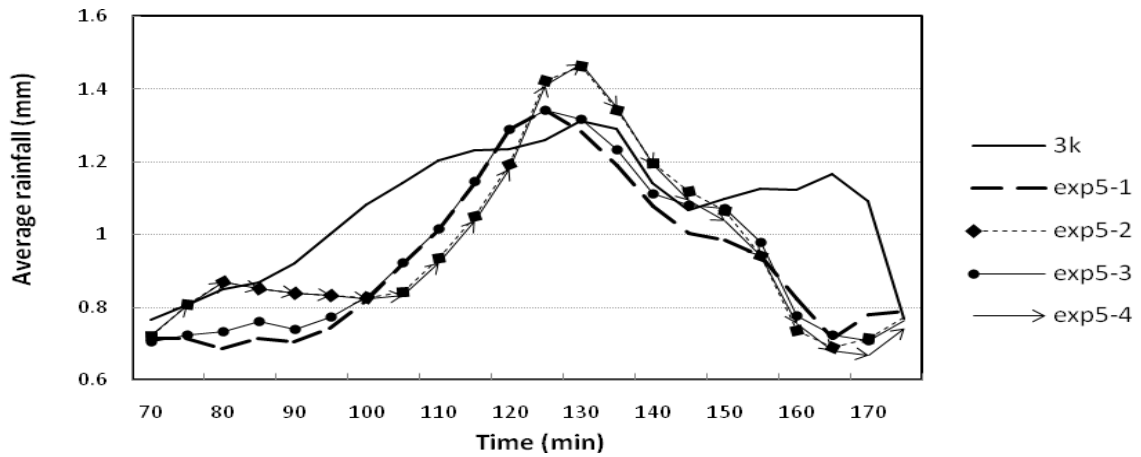


圖 4.26. a 實驗 5-1(長虛線)、5-2(菱形虛線)、5-3(圓點實線)、5-4(箭頭實線)、「natural run」(實線)平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。

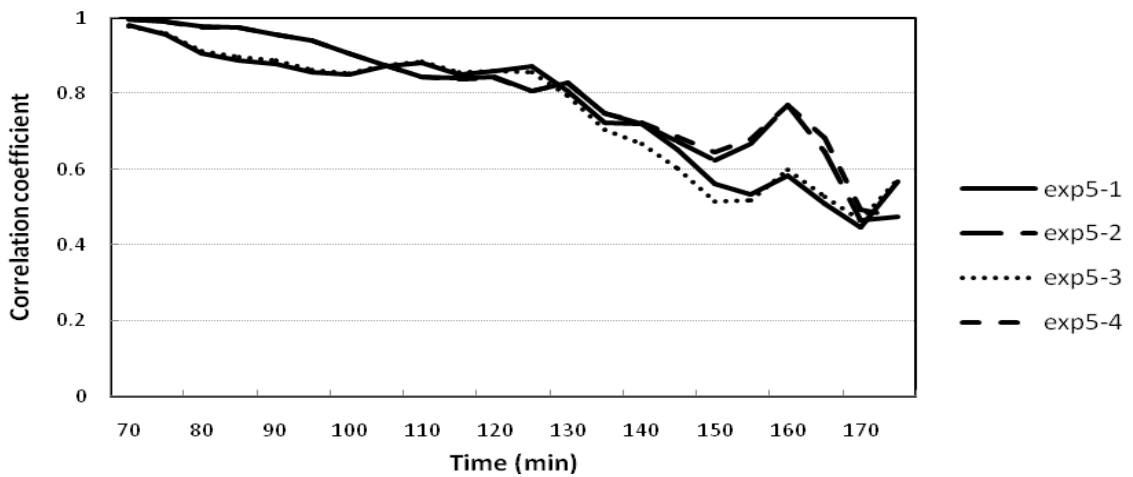


圖 4.26. b 實驗 5-1(實線)、5-2(長虛線)、5-3(點線)、5-4(虛線)分別與「natural run」五分鐘累積降雨量相關性，隨時間變化圖。

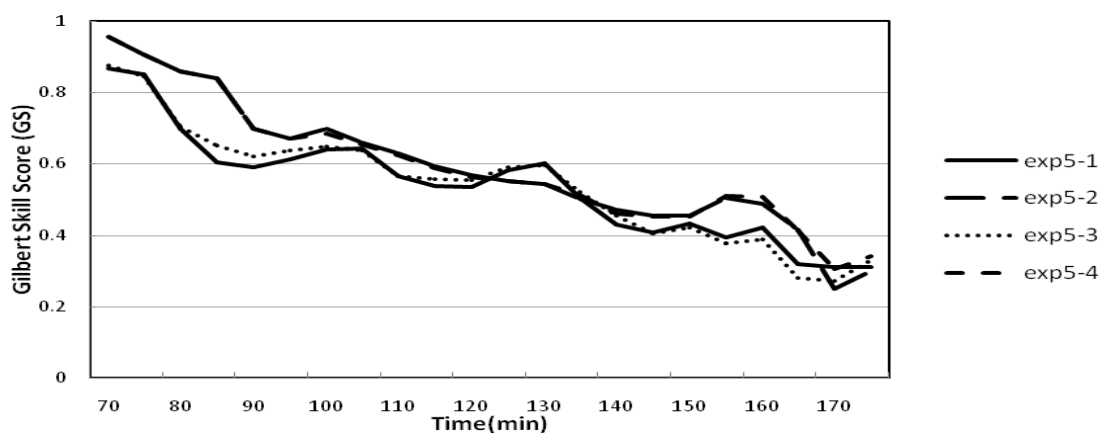


圖 4.26. c 實驗 5-1(實線)、5-2(長虛線)、5-3(點線)、5-4(虛線)「GS」得分隨時間變化圖。

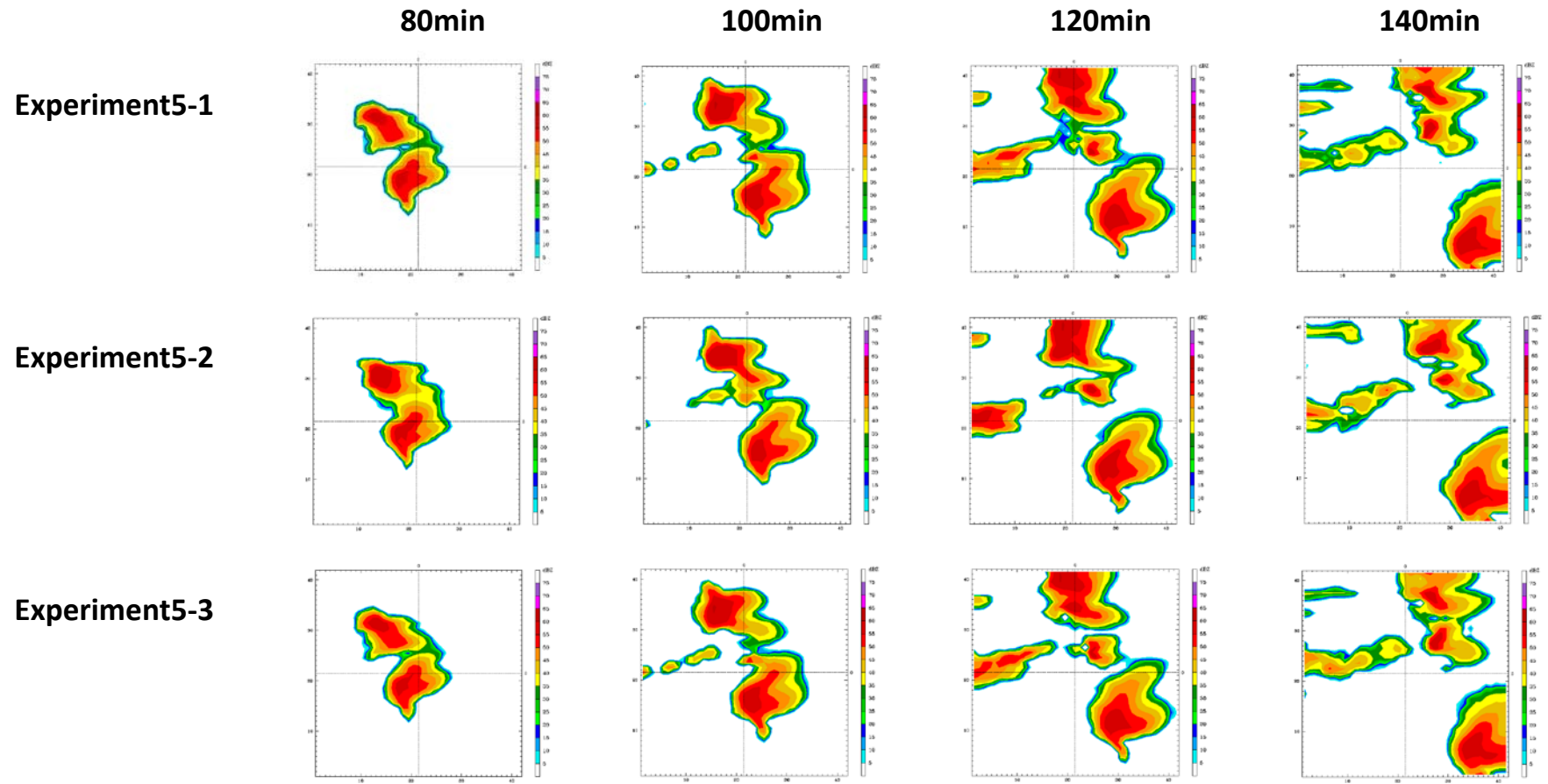


圖 4.27 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為實驗 5-1、5-2、5-3。

Experiment5-4

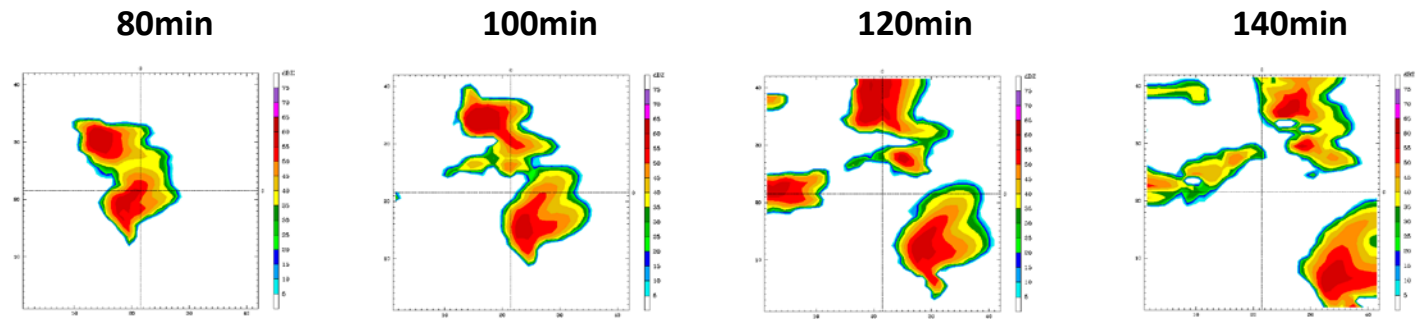


圖 4.27 (續) 實驗 5-4 於模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。

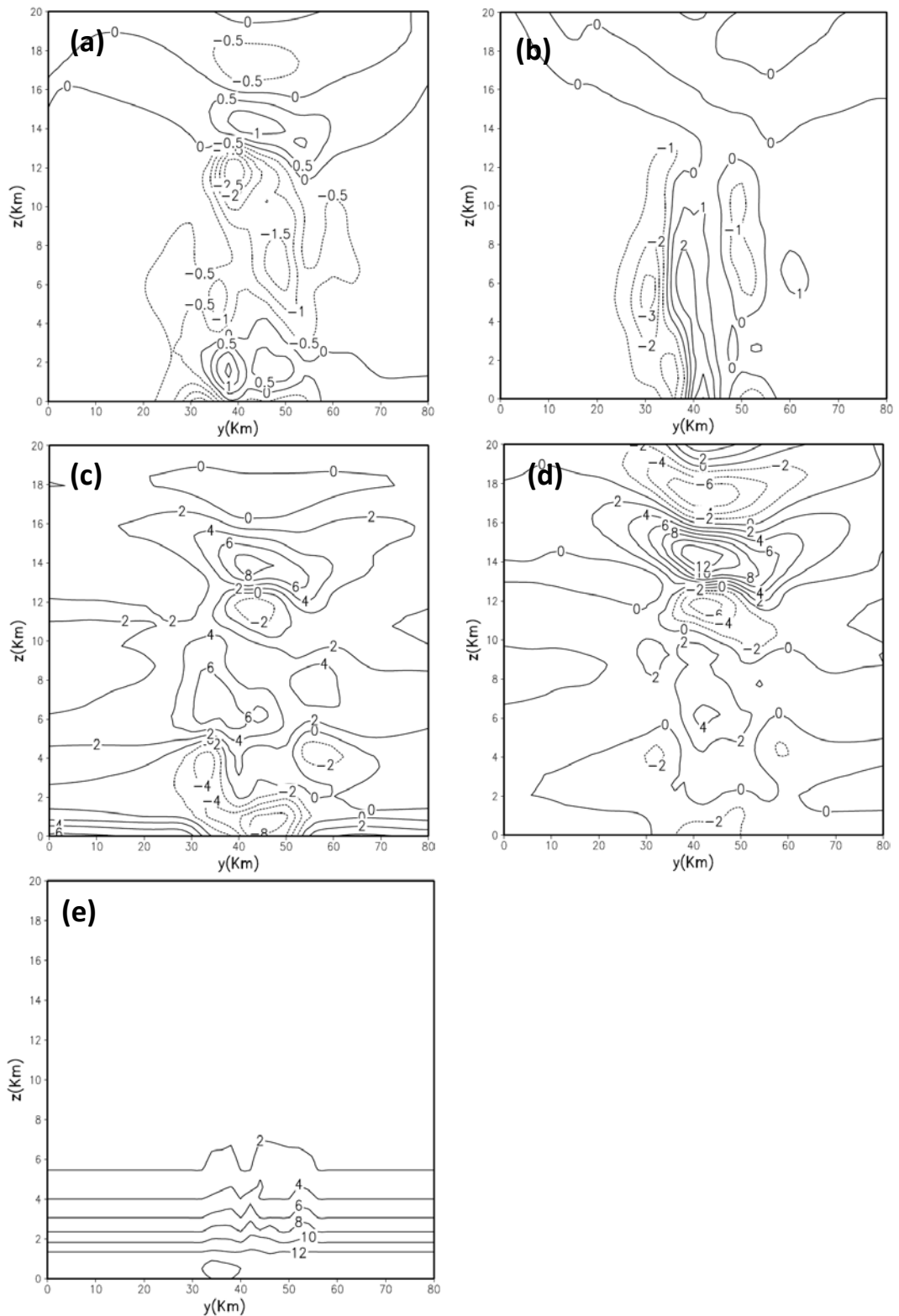


圖 4.28 實驗 6-1 於同化結束(01:00)時,沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。(a). x 方向氣壓梯度,等值線間距為 0.5;(b). y 方向氣壓梯度,等值線間距為 1;(c). z 方向氣壓梯度,等值線間距為 2,氣壓單位為 $100 \times \text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場,等值線間距為 2 度,單位為 K;(e)水汽混合比,等值線間距為 2,單位為 g/kg 。

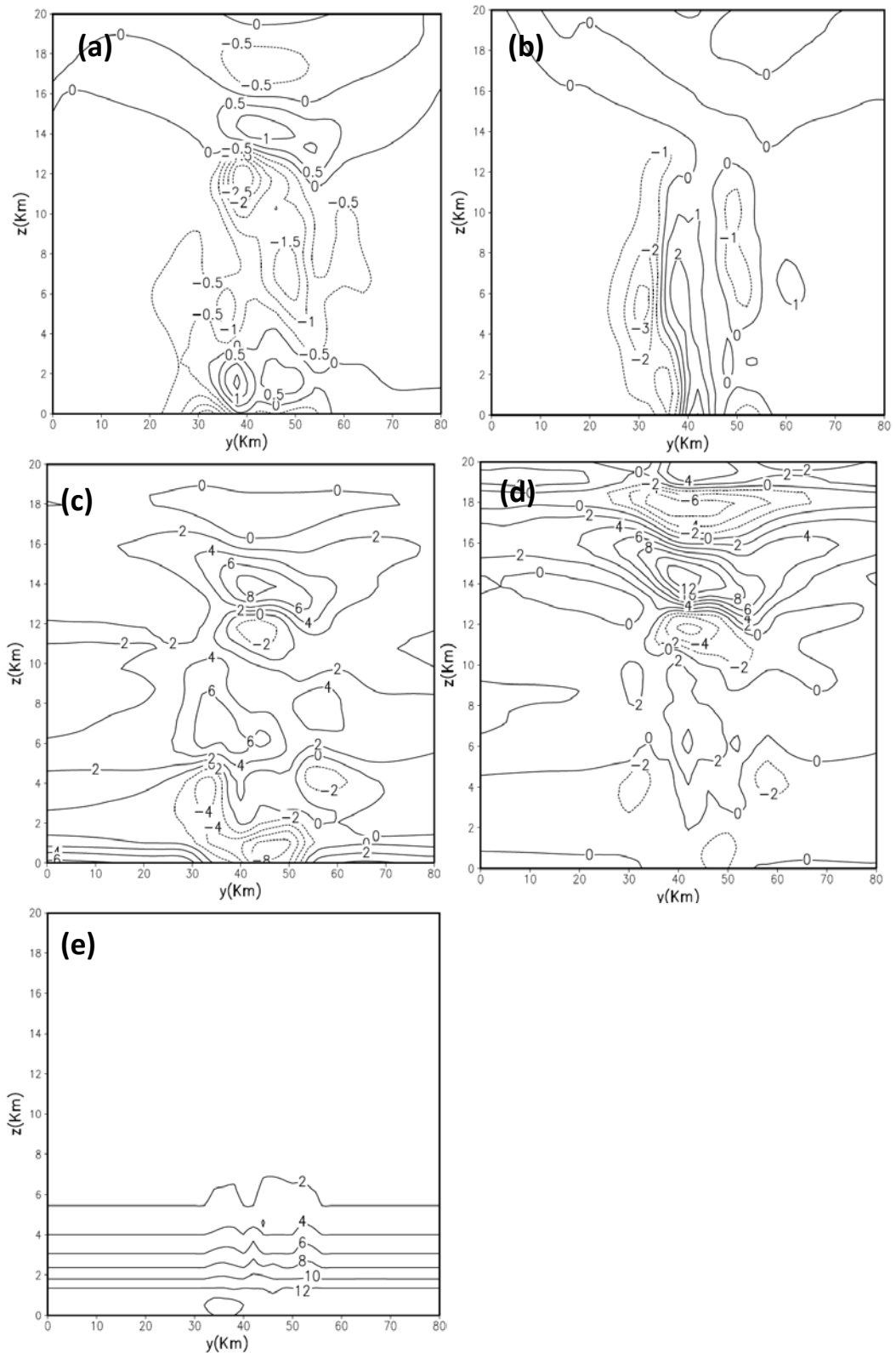


圖 4.29 實驗 6-2 於同化結束(01:00)時，沿 $x=15\text{km}$ 各狀態變數的垂直剖面圖。
 (a). x 方向氣壓梯度，等值線間距為 0.5；(b). y 方向氣壓梯度，等值線間距為 1；
 (c). z 方向氣壓梯度，等值線間距為 2，氣壓單位為 $100\times\text{Pa}$ 。(d) 位溫擾動場，
 等值線間距為 2 度，單位為 K；(e)水汽混合比，等值線間距為 2，單位為 g/kg 。

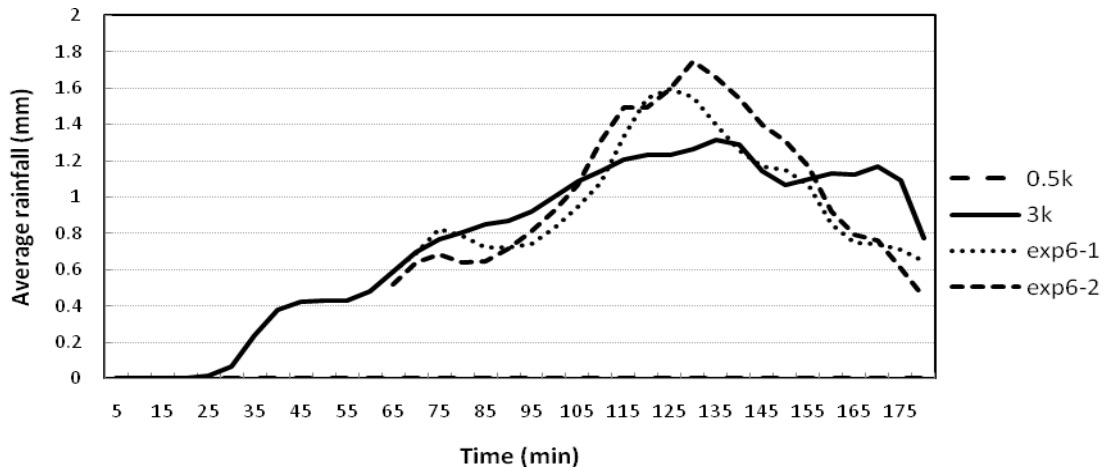


圖 4.30. a 實驗 6-1(點線)、6-2(短虛線)及「natural run」(實線)平均於模擬區域內有降雨網格點上，五分鐘累積降雨量隨時間變化圖。

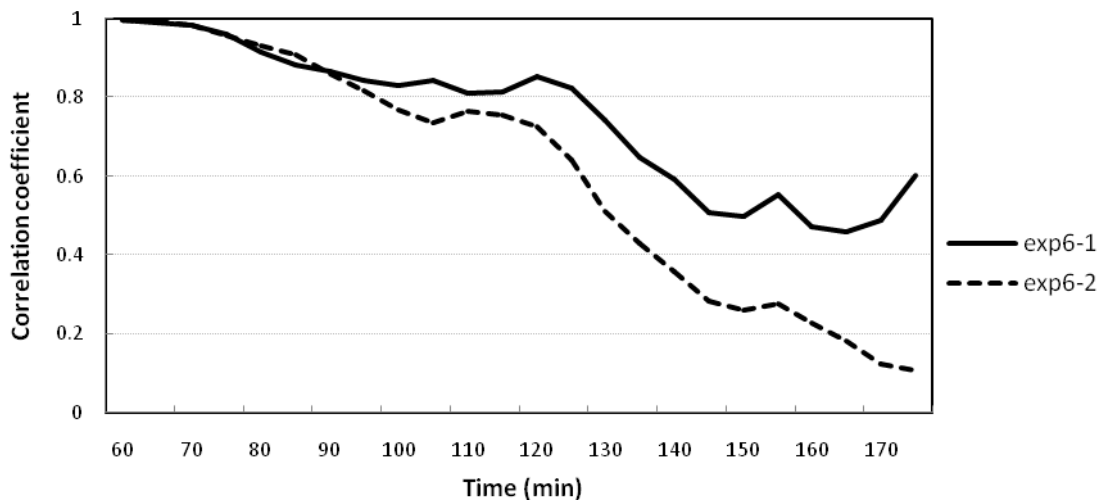


圖 4.30. b 實驗 6-1(實線)、6-2(短虛線)分別與「natural run」五分鐘累積降雨量相關性，隨時間變化圖。

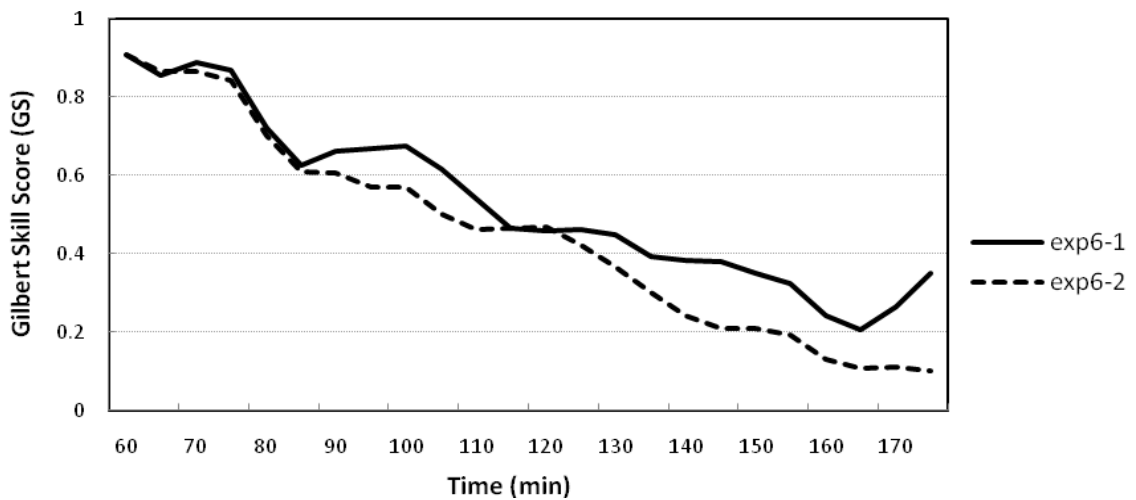


圖 4.30. c 實驗 6-1(實線)、6-2(短虛線)「GS」得分隨時間變化圖。

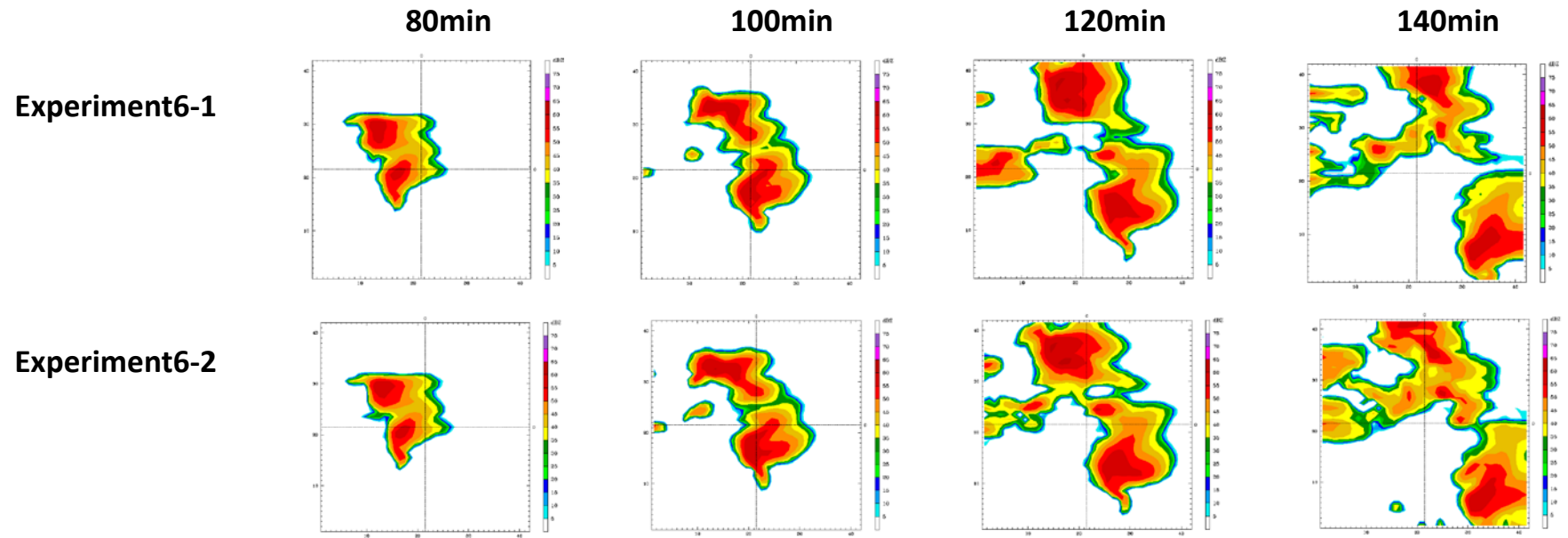


圖 4.31 模擬時間第 80、100、120 及 140 分時的回波場。由上而下依次為實驗 6-1、6-2。

略語表

ADAS	ARPS Data Assimilation System
ARPS	Advanced Regional Prediction System
CC	correlation coefficient
CSI	Critical success index
EnKF	ensemble Kalman filter
GS	Gilbert skill score
OSSE	Observation System Simulation Experiments
RRMSE	relative root mean square error
SCC	SPatial correlation coefficient
SDVR	Single Doppler Velocity Retrieval
VDARS	variational Doppler radar analysis system
WRF	weather research and forecasting model
3DVAR	three-dimensional variational method
4DVAR	four-dimensional variationl method