

以雷達觀測資料反演的分析場改進對流 尺度極短期預報的研究

受委託單位：國立中央大學大氣科學系

研究主持人：廖宇慶

研究期程：中華民國一〇五年四月至一〇五年十二月

研究經費：新臺幣八十六萬元

交通部中央氣象局委託研究

中華民國一〇五年十二月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

交通部中央氣象局

一百零五年度委託研究計畫期末成果報告

以雷達觀測資料反演的分析場改進對流尺度
極短期預報的研究

計畫類別：■氣象 □海象

計畫編號：MOTC-CWB-105-M-05

執行期間：105 年 04 月 01 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：廖宇慶

執行機構：國立中央大學大氣科學系

中華民國 105 年 12 月 5 日

政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	以雷達觀測資料反演的分析場改進對流尺度極短期預報的研究		
計畫編號	MOTC-CWB-105-M-05		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立中央大學大氣科學系		
年度	105 年度	執行期間	105 年 4 月 01 日 至 105 年 12 月 31 日
本期經費 (單位：千元)	860 仟元		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100%	100%	0%
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率 (%)
	860 仟元	860 仟元	100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	廖宇慶		楊伯謙
報告頁數	25 頁	使用語言	中文
中英文關鍵詞	熱動力反演(thermodynamic retrieval)、多都卜勒雷達合成風場 (multiple-Doppler-radar synthesized winds)、下降法(descending method)		

研究目的	<p>熱動力反演(thermodynamic retrieval)是指根據由多部都卜勒雷達所合成的風場，求出熱動力場變數在三維空間中的分布。傳統的熱動力反演法逐一在每個水平面上求解一個與氣壓相關的 Poisson 方程式，但在有地形的情况下，此平面會包含數目與形狀不一的空洞，使得傳統方法無法應用於複雜地形上，此外，傳統方法還需額外的輔助觀測(如:探空)才能解析垂直結構。</p> <p>本研究運用下降法(descending method)，以變分分析極小化由三維動量方程式與一個簡化後的熱力方程式所構成的價值函數，保有不需給定人為邊界條件假設之優點，可直接求解三維的熱動力場分布。經由判斷格點位置是緊靠或遠離地形，本方法可在複雜地形上進行反演，解決傳統方法的限制。</p> <p>本方法將可以提供在台灣複雜地形上，高時空解析度的三維氣象分析場，亦可依據此資訊計算若干挑選後的氣象預報因子(predictor)，並統計其與隨後風暴是否產生，以及產生後的強度與位置等的關聯性。</p>
研究成果	<ol style="list-style-type: none"> 1. 推導熱動力反演各約束條件與價值函數之梯度關係 2. 撰寫熱動力反演計算機程式 3. 理想化乾山嶽波個案測試 4. 理想化單山濕對流個案測試 5. 理想化多山濕對流個案測試 6. 時步敏感度實驗測試 7. 熱動力方程式敏感度實驗 8. 亂流項誤差敏感度實驗
具體落實應用情形	本年度工作重點是熱動力反演方法的發展與測試。
計畫變更說明	無
落後原因	無
檢討與建議 (變更或落後之因應對策)	無

目錄

頁次

一、摘要	1
二、文獻回顧	3
三、反演原理與方法學	4
3.1 多都卜勒雷達風場合成	4
3.2 熱動力反演	5
四、觀測系統模擬實驗	10
4.1 個案介紹	10
4.2 反演表現之檢視	11
4.2.1 近似理想實驗：單峰乾山嶽波個案	12
4.2.2 近似理想實驗：單峰濕山嶽波個案	13
4.2.3 近似理想實驗：多峰濕山嶽波個案	14
4.2.4 時步敏感度實驗	14
4.2.5 熱動力方程式係數敏感度實驗	15
4.2.6 誤差亂流項敏感度實驗	15
五、結論與未來工作	16
參考文獻	24

一、摘要

台灣四面環海、地勢複雜，位處副熱帶，受各類劇烈天氣的影響甚鉅。使用氣象雷達有助於吾人監測並研究劇烈天氣演變之過程。為克服目前缺乏三維空間的溫度、壓力觀測，雷達氣象學中有所謂的熱動力反演方法，其目的是結合由都卜勒雷達所合成的風場，求出熱動力場變數在三維空間中的分布。

傳統的熱動力反演方法先以水平方向的動量方程當作約束條件，逐一在每個水平面上求出包含一個未知常數的壓力擾動，再藉由扣除水平平均後可得到偏差量的唯一解，即 $P' - \langle P' \rangle$ 。因此傳統方法只能得到熱動力場的水平結構，而無法進行垂直熱力結構分析，必須有其他的觀測資料(如:探空)的輔助，方能決定 $\langle P' \rangle$ ，進而求出三維的 P' 。然而探空的時間解析度過低，在實際作業與研究中往往無法配合雷達觀測的時間。此外，傳統方法無法應用在有地形的情况下。

本研究發展的新方法同時使用三維的動量方程式以及簡化的熱力方程式，作為變分分析之約束條件，理論上可不需要額外觀測資料，即可得到三維的熱動力場。在極小化過程，我們改用弱勢約束條件求解，經由判斷格點是位於緊鄰或遠離地形，分別撰寫變分分析中價值函數對控制變數梯度的表示方式，使得本方法可以在複雜地形上直接進行反演計算。

新方法可降低傳統熱力反演的限制，提供在台灣複雜地形上之高時空解析度的三維氣象分析場，有助於吾人探討地形效應與對流演變。此方法不僅

能作為天氣分析的工具與同化系統的資料來源，亦可依據此資訊計算若干挑選後的氣象預報因子，進而統計並檢驗其與風暴生成之位置、強度等的關聯性。

二、文獻回顧

過去數十年間，不少雷達氣象學家致力於發展熱動力反演技術，利用雷達風場資訊建構出與運動場相對應的壓力與溫度場。Gal-Chen (1978)所提出的方法(簡稱 GC78)因其邊界條件的給定沒有人為的假設，故目前仍被廣為運用。但 GC78 反演之物理量為熱動力擾動量「相對於水平平均的偏差量」，即 $P' - \langle P' \rangle$ ，其中 P' 為壓力的擾動量， $\langle \rangle$ 代表水平平均，雖能用於解析大氣的水平結構，卻無法分析垂直結構。GC78 建議可利用反演範圍中，各水平面上至少一點的熱動力場實地觀測(例如:飛機)，即能求得擾動場的水平平均值 $\langle P' \rangle$ ，進而得到「絕對」擾動量 P' 的三維結構，然而飛機觀測受到觀測時間很大的限制。申請人(Liou et al. 2014)曾使用探空資料來代替飛機觀測，但依然受限於時間解析度較低的問題。

Liou (2001)以三維動量和簡化的熱力方程式作為弱勢約束條件，開發新的熱動力反演方法，不需要參數化熱動力方程式中的源匯項，且保有 GC78 不需給定人為邊界條件的優點。鍾等人(2002)以及 Liou et al.(2003)延續 Liou (2001)的工作，納入暖雲微物理過程並將其應用在 1987 年 5 月 17 日 0043LST 在 TAMEX 實驗的 IOP#2 飆線個案，分析此系統的熱動力結構，並以概念化模式驗證反演結果的合理性。

本委託計畫中所要進行的研究，基本上延續 Liou et al. (2003)的工作，但調整其中的計算方式，以便將其推廣到複雜地形上進行反演。

三、反演原理與方法學

3.1 多都卜勒雷達風場合成

都卜勒雷達可提供高時空解析度之風場資訊，但觀測的徑向風為平行雷達波束方向之風場投影量，而非 u 、 v 、 w ，所以有各種雷達風場合成技術被發展出來，以求得三維風場。

本研究利用 Liou and Chang (2009)，Liou et al.(2012、2014)所發展的多都卜勒雷達風場合成方法(WInd Synthesis System using DOppler Measurement，簡稱 WISSDOM)，利用數個都卜勒雷達之徑向風場資訊重建 u 、 v 、 w 。相較於依照幾何概念反演風場的傳統技術，WISSDOM 有以下優點：(a)雷達基線(base-line)上以及鄰近區域的風場 u 、 v 、 w 仍能被反演；(b)使用渦度方程式做為約束條件之一，能直接進行渦度收支的診斷，並有助於增進熱動力反演的精準度(Protat and Zawadzki 2000)；(c)運用沉浸邊界法 (Tseng and Ferziger 2003)，可直接分析出沿著複雜地形的風場結構；(d) 可以納入不同背景場資料(例如：探空、模式預報等)，填補無雷達資料覆蓋的空白區域；(e)可同時使用來自於任何數目雷達的資料。

3.2 熱動力反演

三維的動量方程式可表示為：

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

$$\frac{1}{\theta_{v0}} \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla v + fu + turb(v) \right] = -\frac{\partial \pi'}{\partial y} \equiv -G \quad (2)$$

$$\frac{1}{\theta_{v0}} \left[\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla w + turb(w) + g(q_r + q_s) \right] = -\frac{\partial \pi'}{\partial z} + g \frac{\theta'_c}{\theta_{v0} \theta_0} \equiv -H \quad (3)$$

\vec{V} 為風場 u 、 v 、 w ； f 代表科氏參數； g 是重力； π 為標準化氣壓，定義如下：

$$\pi = C_p \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (4)$$

P 為壓力， P_0 是參考氣壓， $1000hPa$ ； R 為氣體常數； C_p 代表等壓比熱常數。 θ 為位溫； θ_v 代表虛位溫； θ'_c 是虛雲位溫擾動量，其定義為：

$$\theta'_c = \theta' + (0.61q'_v - q_c)\theta_0 \quad (5)$$

上式中 q_v 為水氣混合比， q_c 是雲水混合比(單位： kg/kg)。方程式中下標「0」代表基本態，表示降水系統擾動尚未發生前所代表的大氣基本狀態，並假設在水平上均勻分布，僅隨高度變化。上標「'」則為相對基本態之擾動量。

$turb()$ 表示次網格亂流項，使用參數化計算，方式如下：

$$turb() = K \left(\frac{\partial^2 ()}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 ()}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 ()}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

K 為次網格黏滯係數，100。 q_r 和 q_s 分別為雨水、雪水混合比(單位：kg/kg)。以多雷達合成之三維風場和以未降雨前探空觀測給定之基本態，即能求出 F 、 G 、 H ，也就是以風場連接到熱動力場。

熱動力方程式表示為：

$$u \frac{\partial \theta'_c}{\partial x} + v \frac{\partial \theta'_c}{\partial y} + w \frac{\partial \theta'_c}{\partial z} + w \frac{d\theta_0}{dz} + S = 0 \quad (7)$$

$$S = \frac{\partial \theta'_c}{\partial t} + \text{turb}(\theta'_c) - \text{source} / \text{sink} \quad (8)$$

S 包含 θ'_c 之時間微分項、擴散項以及源匯項之總和。相對於傳統上對進行 S 參數化，本研究則將其視為未知數同時反演。

熱動力反演運用變分分析中之弱勢約束條件，透過對壓力擾動梯度和溫度擾動進行約束，得到熱動力擾動量的最佳三維分布，其價值函數表示為：

$$J = \sum_{i=1}^4 J_i \quad (9)$$

J 為總價值函數， J_i 為各約束條件之價值函數，共四項，各約束條件如下：

$$J_1 = \sum_{xyz} \alpha_1 \left[\frac{\partial \pi'}{\partial x} - F \right]^2 \quad (10)$$

$$J_2 = \sum_{xyz} \alpha_2 \left[\frac{\partial \pi'}{\partial y} - G \right]^2 \quad (11)$$

$$J_3 = \sum_{xyz} \alpha_3 \left[\frac{\partial \pi'}{\partial z} - g \frac{\theta'_c}{\theta_0 \theta_{v0}} - H \right]^2 \quad (12)$$

$$J_4 = \sum_{xyz} \alpha_4 \left[u \frac{\partial \theta'_c}{\partial x} + v \frac{\partial \theta'_c}{\partial y} + w \frac{\partial \theta'_c}{\partial z} + w \frac{d\theta_0}{dz} + S \right]^2 \quad (13)$$

約束條件(10)至(13)式分別約束 x 、 y 方向擾動氣壓梯度、 z 方向氣壓力梯度力與溫度擾動本身，以及溫度擾動沿三個方向的梯度， α 為權重係數，下標代表給予各約束條件不同權重， α_{1-3} 皆為 1， α_4 則參考 Liou (2001) 之設定，權重與風速呈反比關係，如(14)式，目的為使各約束條件比重相當。

$$\alpha_4(V) = \frac{V^2}{V_0^4 + V^4} * 2V_0^2 * 10^{-3} \quad (14)$$

其中的 V_0 是參考風速，設定為 1.5 m s^{-1} 。此式運算時先區分出地形區與流體區，再運用弱勢約束條件來推導出位於流體區的邊界點與內部點，前述價值函數對控制變數的梯度，再使用下降法(descending method; Liu and Nocedal 1988)求解。

由於在求解過程中需要知道價值函數於每一格點對控制變數(π' 、 θ'_c 、 S')之梯度，於內部、最近邊界之格點分別使用中間、單邊差分求梯度，利用變分分析推導，如下所述:

$$C_1 = \left(\frac{\partial \pi'}{\partial x} - F \right) \quad (15)$$

$$C_2 = \left(\frac{\partial \pi'}{\partial y} - G \right) \quad (16)$$

$$C_3 = \left(\frac{\partial \pi'}{\partial z} - g \frac{\theta'_c}{\theta_0 \theta_{v0}} - H \right) \quad (17)$$

$$C_4 = \left(u \frac{\partial \theta'_c}{\partial x} + v \frac{\partial \theta'_c}{\partial y} + w \frac{\partial \theta'_c}{\partial z} + w \frac{d\theta_0}{dz} + S \right) \quad (18)$$

內部區域:

$$\frac{\partial J}{\partial \pi'} = -\alpha_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} - \alpha_2 \frac{\partial C_2}{\partial y} - \alpha_3 \frac{\partial C_3}{\partial z} \quad (19)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta'_c} = -g \frac{\alpha_3 C_3}{\theta_0 \theta_{v0}} - \alpha_4 \left(u \frac{\partial C_4}{\partial x} + v \frac{\partial C_4}{\partial y} + w \frac{\partial C_4}{\partial z} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial J}{\partial S'} = \alpha_4 C_4 \quad (21)$$

地形邊界:

$x = x$ 左邊界

$$\frac{\partial J}{\partial \pi'} = -\alpha_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \quad (22)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta'_c} = -\alpha_4 u \frac{\partial C_4}{\partial x} \quad (23)$$

$$\frac{\partial J}{\partial S'} = 0 \quad (24)$$

$x = x$ 右邊界

$$\frac{\partial J}{\partial \pi'} = \alpha_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \quad (25)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta'_c} = \alpha_4 u \frac{\partial C_4}{\partial x} \quad (26)$$

$$\frac{\partial J}{\partial S'} = 0 \quad (27)$$

$y = y$ 左邊界

$$\frac{\partial J}{\partial \pi'} = -\alpha_2 \frac{\partial C_2}{\partial y} \quad (28)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta'_c} = -\alpha_4 v \frac{\partial C_4}{\partial y} \quad (29)$$

$$\frac{\partial J}{\partial S'} = 0 \quad (30)$$

$y = y$ 右邊界

$$\frac{\partial J}{\partial \pi'} = \alpha_2 \frac{\partial C_2}{\partial y} \quad (31)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta'_c} = \alpha_4 v \frac{\partial C_4}{\partial y} \quad (32)$$

$$\frac{\partial J}{\partial S'} = 0 \quad (33)$$

$z = z_{\text{下邊界}}$

$$\frac{\partial J}{\partial \pi'} = -\alpha_3 \frac{\partial C_3}{\partial z} \quad (34)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta'_c} = -\alpha_4 w \frac{\partial C_4}{\partial z} \quad (35)$$

$$\frac{\partial J}{\partial S'} = 0 \quad (36)$$

$z = z_{\text{上邊界}}$

$$\frac{\partial J}{\partial \pi'} = \alpha_3 \frac{\partial C_3}{\partial z} \quad (37)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta'_c} = \alpha_4 w \frac{\partial C_4}{\partial z} \quad (38)$$

$$\frac{\partial J}{\partial S'} = 0 \quad (39)$$

上述計算流程給予0為擾動初始猜測值，經過重複疊代使得價值函數趨近最小值，即得到最佳解。

四、觀測系統模擬實驗

新方法的研發必先確認該法之正確性，但於現實中收集覆蓋完整、符合物理定律之三維大氣觀測變量是不可行的，因此本節利用數值模式的模擬提供完整的三維風場，進行反演，再比對反演結果與模式產生的熱動力場(視為真值)，藉此確認程式正確性以及測試新方法之敏感度。

4.1 個案介紹

本研究使用 WRF Ver 3.3.1，進行理想化個案模擬，模擬的項目分為乾山嶽波、單山濕對流及多山濕對流共三個個案，內插網格設計為 $71 \times 41 \times 30$ ，水平、垂直解析度為 1 公里、0.5 公里。不使用積雲、邊界層參數化，消散項使用常數形式，設為 100；積分時步為 5s；模式層頂為 18 km，阻尼層自頂層向下延伸 2.0 km；邊界條件部分，四邊皆為開放邊界條件。三個案區別如下：

乾山嶽波，初始探空設定為地表位溫 288K，以 2.95K km^{-1} 向上遞增，水氣混合比為 0 g kg^{-1} ，風場部分為 10 m s^{-1} 之均勻西風，取模擬時間 30 分鐘做熱動力反演。

濕對流組，初始探空設定為地表位溫 300K，位溫梯度遞增率為 1.0 K km^{-1} ，水氣混合比由 14 g kg^{-1} ，至 10 公里高遞減至 0.1 g kg^{-1} 並保持常數，取模擬時間 15 分鐘做熱動力反演，目的在於將 $\Delta T=1\text{K}$ 之水平延伸 10km、垂直 1.5km 之熱胞(thermal bubble)與對流現象留在山區，理想個案中，初始資料已符合控制方程式，故沒有初始化問題。

山型設定上使用理想鐘型山形公式:

$$H(x, y) = \frac{h}{\left[\left(\frac{x - x_0}{a} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{b} \right)^2 + 1 \right]^{1.5}} \quad (40)$$

$H(x, y)$ 為地形高度(m); h 是山頂高度(m); x_0, y_0 代表山脈中心位置; a, b 則為東西、南北向之半山寬, 即由山頂水平延伸至此距離, 地勢將降為山頂之一半高度。在乾山嶽波個案中, 山型設定為高度 2.5 km; 東西、南北向半山寬 5.0 km, 鐘型山中心位置坐標設定在(24,21); 在單山濕對流個案中, 山型設定與乾山嶽波個案相同, 鐘型山中心位置坐標設定在(48,21); 而在多山濕對流個案中, 除了單山濕對流個案中的鐘型山外, 加入另一座鐘型山進行模擬, 山型設定為高度 1.5 km; 東西、南北向半山寬 5.0 km, 鐘型山中心位置坐標設定在(24,21)。

4.2 反演表現之檢視

為以客觀角度檢視反演結果, 使用空間相關係數(SCC)、相對方均根誤差(R_RMSE)來定性與定量的比較反演結果與模式輸出, 定義如下:

$$SCC(A) = \frac{\sum (A_r - \bar{A}_r)(A_t - \bar{A}_t)}{\sqrt{\sum (A_r - \bar{A}_r)^2 \sum (A_t - \bar{A}_t)^2}} \quad (41)$$

$$R_RMSE(A) = \frac{\sqrt{\frac{\sum (A_r - A_t)^2}{N}}}{\sqrt{\frac{\sum A_t^2}{N}}} \quad (42)$$

A 可為壓力、溫度，下標 r 代表反演；t 為模式， $\bar{\quad}$ 是該物理量之三維平均，N 為三維反演區之格點數。空間相關係數越趨於 1 越佳，用以定性描述反演和模式之相似度；相對方均根誤差越近 0 越好，用以定量分析反演和模式之誤差百分比。

4.2.1 理想實驗：單山峰乾山嶽波個案

以最小積分時步 5s 和模式輸出風場當成觀測資料，圖 1 分別描述乾山嶽波個案，積分 30 分鐘，於 1.5 km、5.0 km 高度之 x-y 水平剖面之模式輸出(視為真值)與反演之壓力與溫度擾動場。於 1.5km 處出現迎風側高壓/冷區，背風側低壓/暖區，但反演的迎風面高壓區範圍較真實的結果略大。5.0 km 於迎風側仍受下方地形效應之影響，而背風側主要由山嶽波擾動所主導。圖 2 則為沿中心處 x-z 垂直剖面之模式模擬與反演結果。由垂直剖面可以看出迎風側有一位溫的低值區，這是因為受地形抬升的氣流將底層較冷的位溫往上平流所致，至於背風側則有一因越山沉降增溫所形成之暖區，並與低壓區位置吻合，垂直剖面顯示出在背風側有很明顯之波動形式的熱力參數分布。另外值得一提的是，由圖 2(c)(d)可見，本方法可以反演出熱力方程中的源匯項，此源匯項與大氣中的微物理過程有關，未來可將其做進一步的分解，再針對各

項進行探討。

4.2.2 理想實驗：單山峰濕山嶽波個案

本小節進行納入微物理過程，使用暖雨過程，於模擬中不產生冰相粒子，此實驗組由於水氣的納入，將使控制方程式的平衡關係更為複雜，亦即運用熱動力、風場資訊計算之 F 、 G 、 H 的誤差會更大。圖 3(a)(b) 為水平剖面，顯示低層迎風、背風側分別受到熱胞和垂直平流之影響而有暖區存在並對應到低壓。從圖 3(c)(d) 在 5km 高度之熱動力擾動強度則明顯下降，反演結果在系統所在位置 ($x \sim 45\text{km}$, $y \sim 0\text{km}$) 有不錯的表現，但位於下游 ($x > 55\text{km}$) 處的正值壓力擾動則反演的效果相對較弱。在圖 4(a)(b) 所顯示的垂直剖面部分，於暖區下方(上方)有相對低壓(高壓)，故造成暖區上方垂直速度隨高度遞減(圖未示)。相比前一個個案，本實驗的反演結果會比較不平滑，但仍可以透過調整平滑項的權重來改善，整體的分布仍保有相當的正確度。至於圖 4(c)(d) 所顯示的源匯項，由於微物理過程的納入，該項除有溫度擾動的趨勢項外，亦有水氣資訊的消長包含在內，而反演結果顯示出與模式輸出的真實參考值有相當高的一致性。在分數方面，參考表 1，反演之壓力與溫度之 SCC 皆高於 0.95。此實驗組顯示出引入微物理過程雖導致較大的複雜性，此一反演方法仍成功反演迎風側的由熱胞造成之暖區以及低層低壓，以及中層的高壓，且反演源匯項的量值與分布和真值接近，顯示出新熱動力反演運用於濕個案中仍有合理的表現，並且不會出現垂直結構誤判的情況。

4.2.3 理想實驗：多山峰濕山嶽波個案

在多山峰濕對流的個案中，圖 5 顯示在低層迎風、背風側分別受到熱胞和垂直平流之影響，而有暖區存在，並對應到低壓的分布區域也掌握得相當不錯，表示在較為複雜的地形上也可以反演出合理的結果。而從圖 6 可看到溫度和壓力在地形上的垂直結構都有被完整地反演出來，雖然強度的部分有差異，主要是因為地形比前面的實驗更複雜。由上述這些實驗說明此方法可以在乾或濕大氣狀態下成功反演出熱力場，儘管在給定理想資料情況下，熱動力反演結果與模式輸出略有差異，但擾動分布與量值並沒有過多的偏差，特別在擾動量較大區域，有極高的相似性，且可以正確反演出垂直的結構。

4.2.4 時步敏感度實驗

由於現行作業化雷達系統需要 5 至 10 分鐘完成一次體積掃描，而 F 、 G 、 H 計算中包含速度趨勢項，過長的時間間格 Δt 是否將引入過大之誤差至 F 、 G 、 H 中是有待驗證的，因此本小節以不同時步檢測差分誤差對應於反演結果的影響。於乾山嶽波個案分別選用 5s(最小積分時步)、60s、120s 和 600s，由表 2 之分數檢視，儘管 Δt 是達 10 分鐘，相比目前作業化雷達網絡平均約 7.5 分鐘之時間解析度更低，反演結果仍有良好的表現， SCC 皆維持在 0.9 以上， R_RMSE 也無顯著成長，由此可結論出此方法應用於作業化雷達觀測系統之可行性。

4.2.5 熱動力方程式係數敏感度實驗

由於現實中，無法正確描述熱力方程式中源匯項之大小，因此設定與其量值相應的權重係數有一定的難度，此一係數的設定對結果是否敏感亦為待檢視之問題，本小節以不同係數調整熱動力方程式之約束程度來檢視誤差。於乾山嶽波個案分別將熱力方程式原定係數 α_4 予以放大或縮小，發現本實驗中所選取的係數，可以產生合理的結果，因此會運用在未來的真實個案中。

4.2.6 參數化亂流項敏感度實驗

由於動量方程式中含有需進行參數化的亂流項，本小節測試參數化亂流項對於反演結果的敏感度。於乾山嶽波個案中將次網格黏滯係數(K)分別乘以 2、5 以及 10，如表 3 所示。壓力擾動部分沒有隨著係數的改變有太大的影響，但溫度擾動之反演有相對明顯的變化，SCC 則皆達 0.9 以上。總體而言，反演結果對目前係數的改變並不敏感，可能因為亂流項本身量值相對於趨勢項和平流項為較小，故得此結果。

五、結論與未來工作

本年度的工作在於新熱動力反演技術的公式推導、計算機程式的撰寫與測試，其目的在於利用 WISSDOM 所合成之沿地形上的風場，進而解析地形上的溫度與壓力等熱動力場，並且嘗試在無額外的觀測資料輔助下，仍能夠得到熱動力場的三維結構。

本年度測試乾山嶽波、單峰濕對流及多峰濕對流三個個案，檢視新方法之表現。結果顯示此方法能夠在引入微物理過程、複雜山型的條件下，成功反演複雜地形上的熱動力場。此外，並進行多項實驗，以測試時步、熱力方程式係數以及亂流項誤差對於反演結果之敏感度。總體來言，理想個案之實驗結果顯示新方法之合理性與程式的正確性。

未來的工作為真實個案的應用與分析，利用環島雷達網資料合成出複雜地形上的三維風場，再以本計畫所研發的熱動力反演技術，得到山區的壓力及溫度擾動場，並以其它的觀測資料驗證反演場的準確度，再根據分析的氣象變數測試各種挑選過的預報因子。並選取台灣地區強降雨系統個案，評估哪些預報因子對於後續雷暴的形成具有顯著的預報能力。

表1. 熱動力場、風場計算 F 、 G 、 H 之反演比較

	單峰乾山嶽波	單峰濕山嶽波
SCC_P'	0.99	0.99
R_RMSE_P'	0.28	0.50
SCC_T'	0.99	0.97
R_RMSE_T'	0.09	0.35

表 2. 時步敏感度測試

	5s	60 s	120 s	600 s
SCC_P'	0.99	0.99	0.98	0.92
R_RMSE_P'	0.28	0.28	0.27	0.27
SCC_T'	0.99	0.99	0.99	0.94
R_RMSE_T'	0.09	0.09	0.1	0.13

表 3. 亂流項誤差敏感度測試

	$K=100$	$\times 2$	$\times 5$	$\times 10$
SCC_P'	0.99	0.99	0.98	0.96
R_RMSE_P'	0.28	0.26	0.25	0.24
SCC_T'	0.99	0.98	0.98	0.94
R_RMSE_T'	0.09	0.11	0.09	0.25

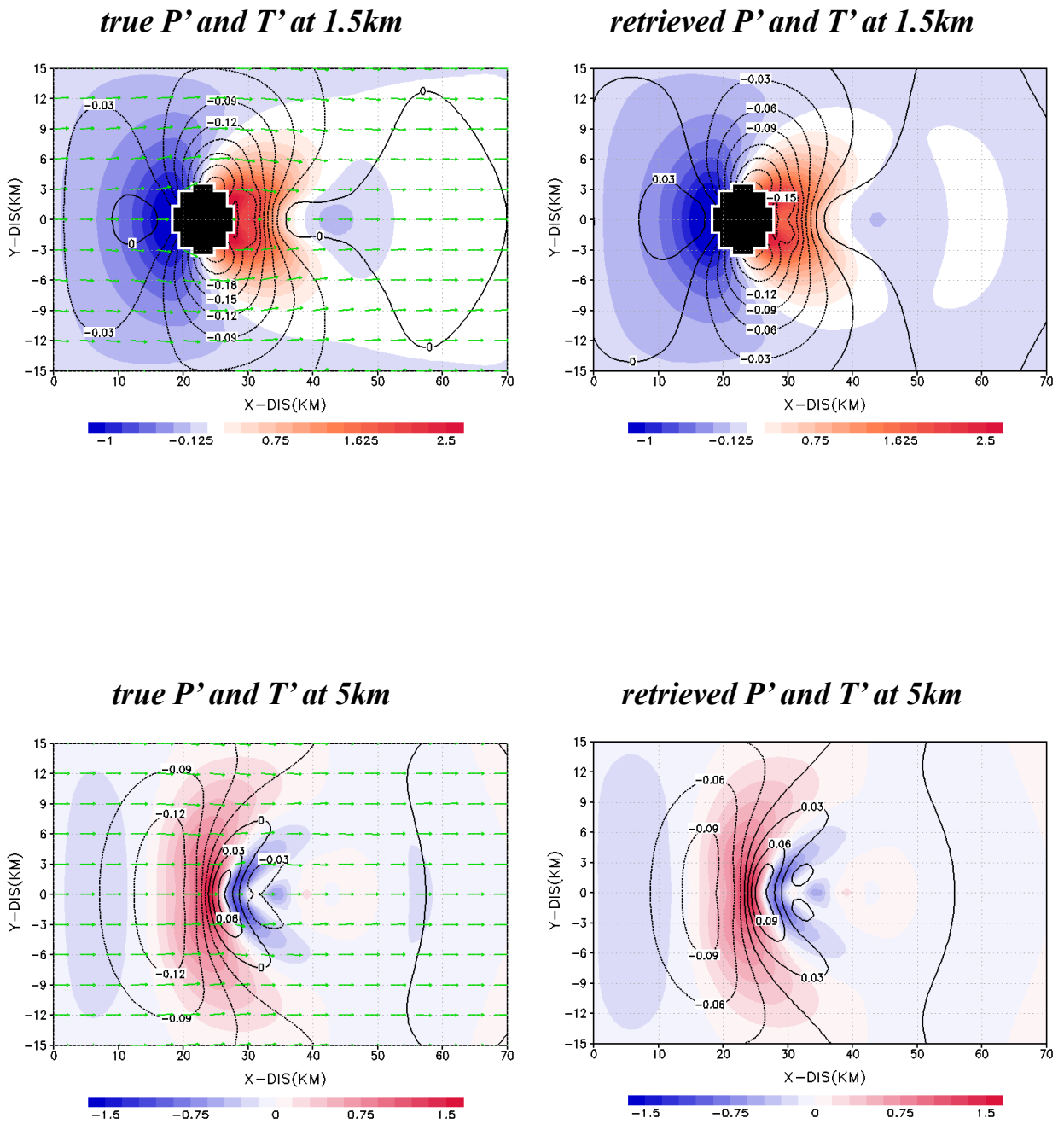


圖 1. (a)(c)描述乾山嶽波個案，1.5km、5.0 km 高度之 x-y 剖面之模式輸出壓力(等值線)與溫度(色階)擾動場(視為真值)，(b)(d)為熱動力反演之結果，綠色箭號代表水平風場。

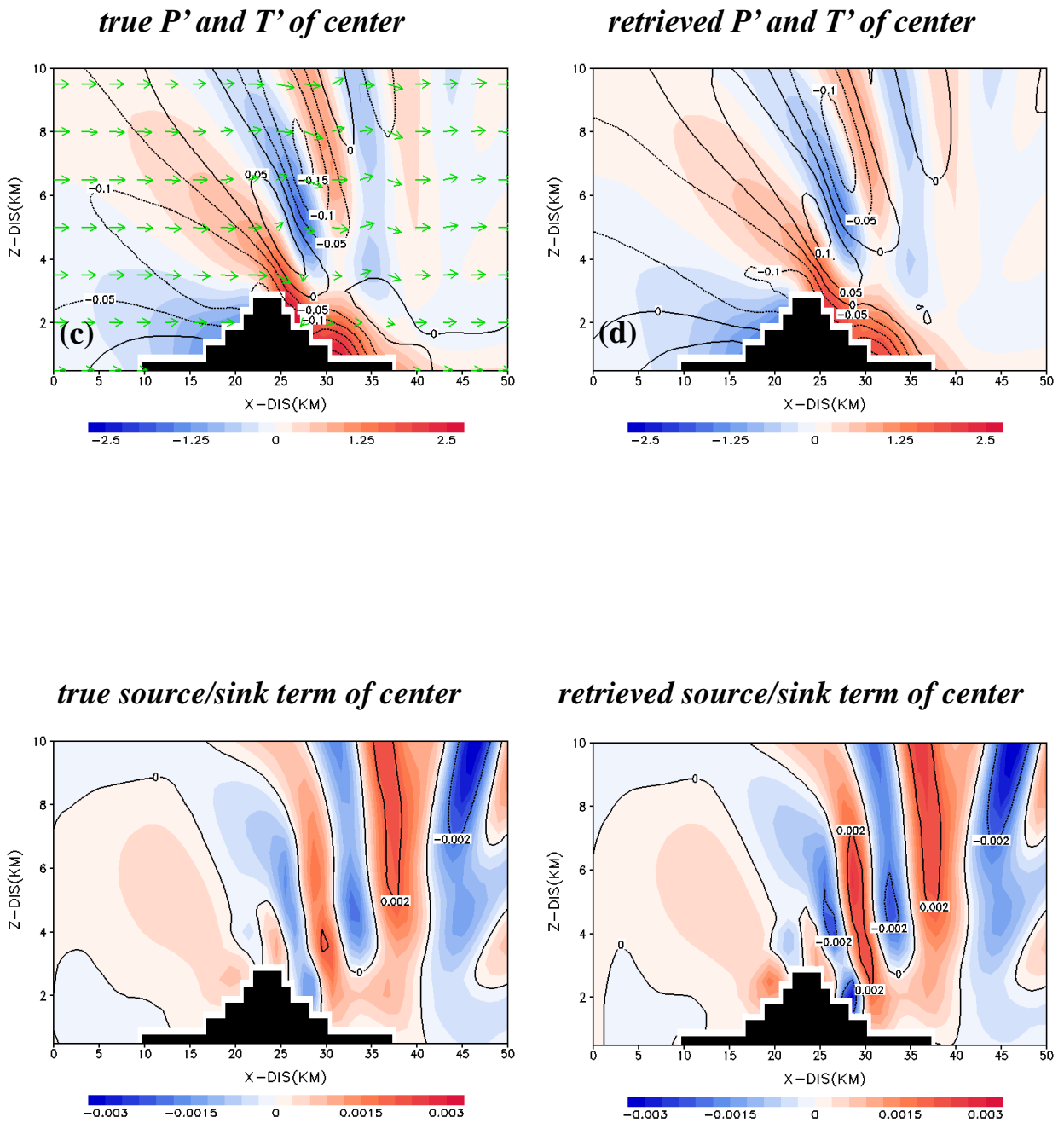


圖 2. (a)(b)描述乾山嶽波個案，為通過中心處 x-z 剖面之模式輸出(視為真值)與反演之壓力(等值線)與溫度(色階)擾動場。(c)(d)分別為模式輸出與反演之源匯項，用以檢視熱力方程式作為約束條件之表現，綠色箭號代表 u-w 風場。

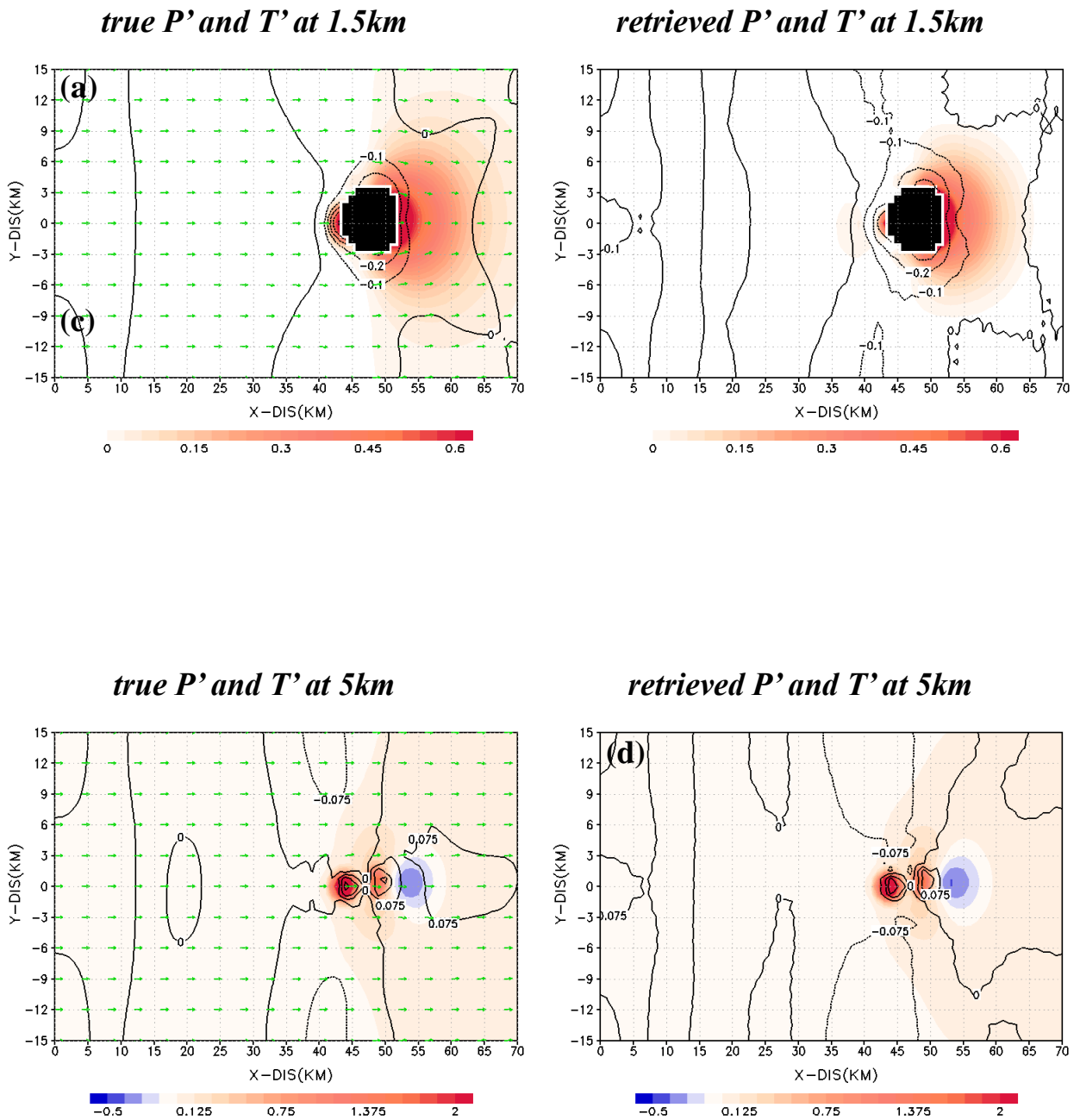


圖 3. (a)(c)描述單山濕對流個案，1.5km、5.0 km 高度之 x-y 剖面之模式輸出壓力(等值線)與溫度(色階)擾動場(視為真值)，(b)(d)為熱動力反演之結果，綠色箭號代表水平風場。

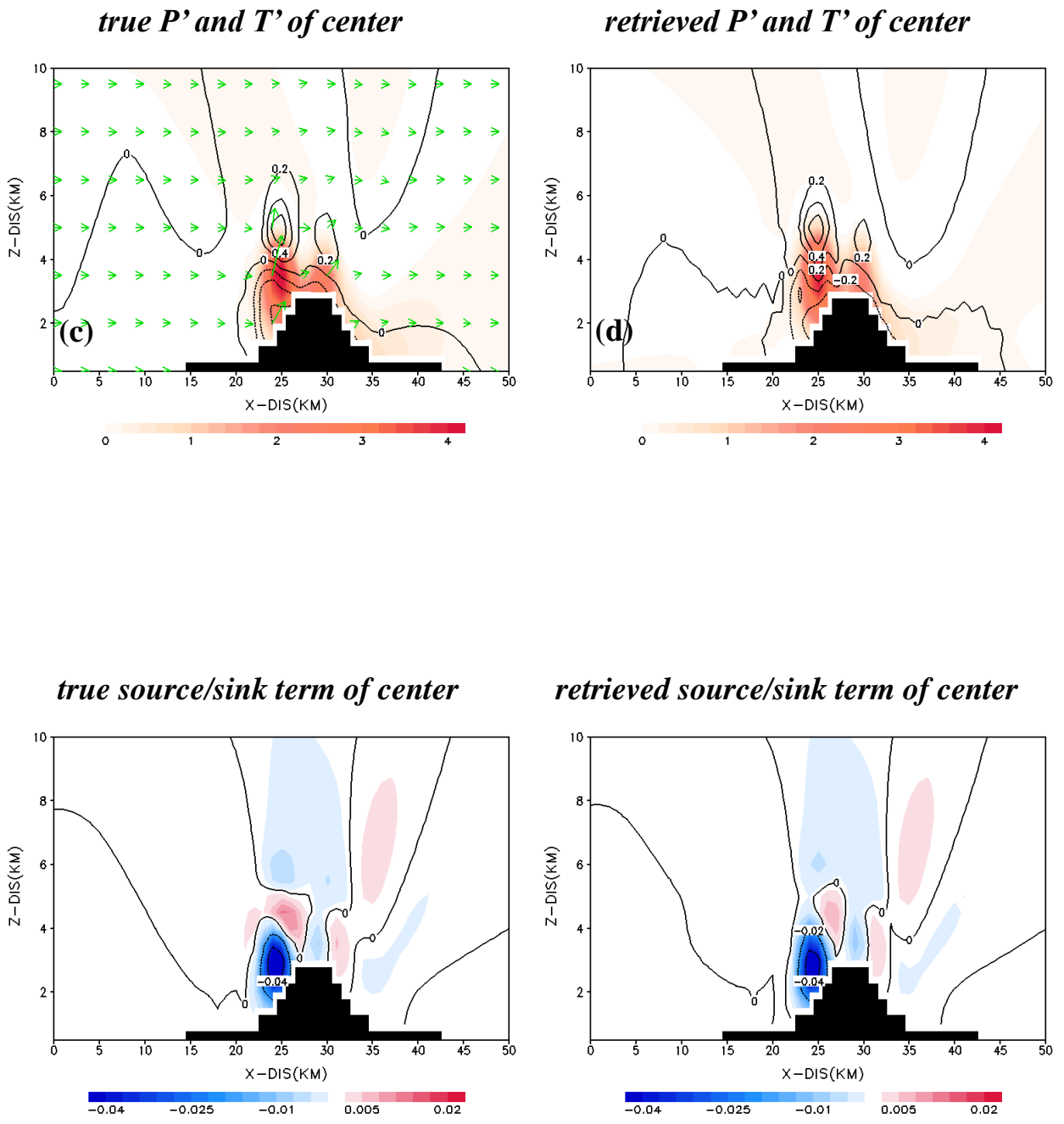
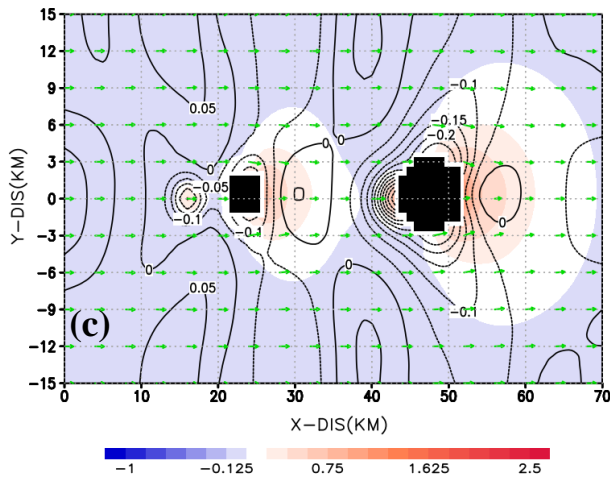
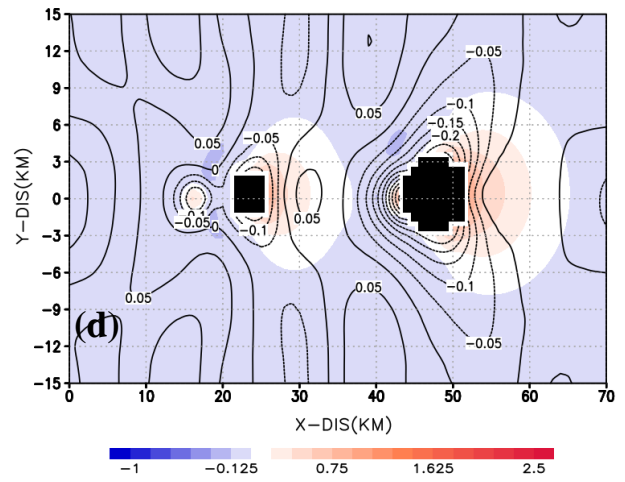


圖 4. (a)(b)描述單山濕對流個案，為通過中心處 x-z 剖面之模式輸出(視為真值)與反演之壓力(等值線)與溫度(色階)擾動場。(c)(d)分別為模式輸出與反演之源匯項，用以檢視熱力方程式作為約束條件之表現，綠色箭號代表 u-w 風場。

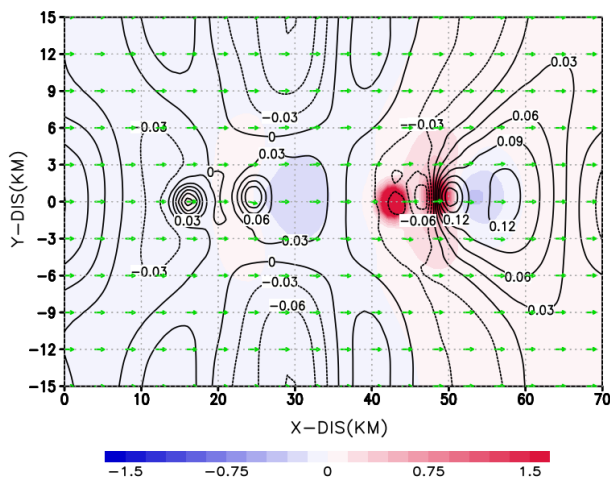
true P' and T' at 1.5km



retrieved P' and T' at 1.5km



true P' and T' at 5km



retrieved P' and T' at 5km

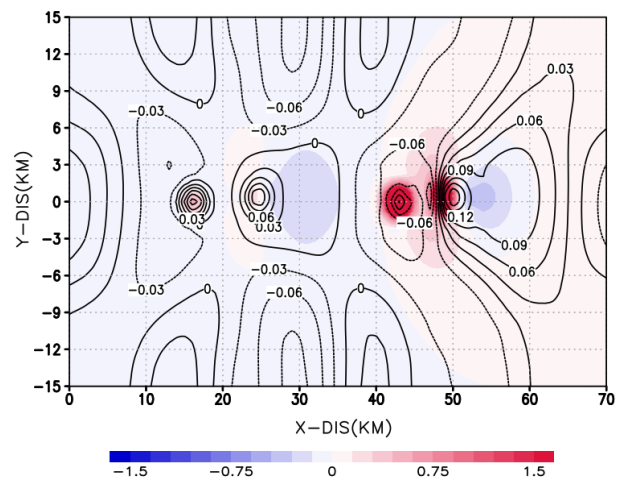


圖 5. (a)(c)描述多山濕對流個案，1.5km、5.0 km 高度之 x-y 剖面之模式輸出壓力(等值線)與溫度(色階)擾動場(視為真值)，(b)(d)為熱動力反演之結果，綠色箭號代表水平風場。

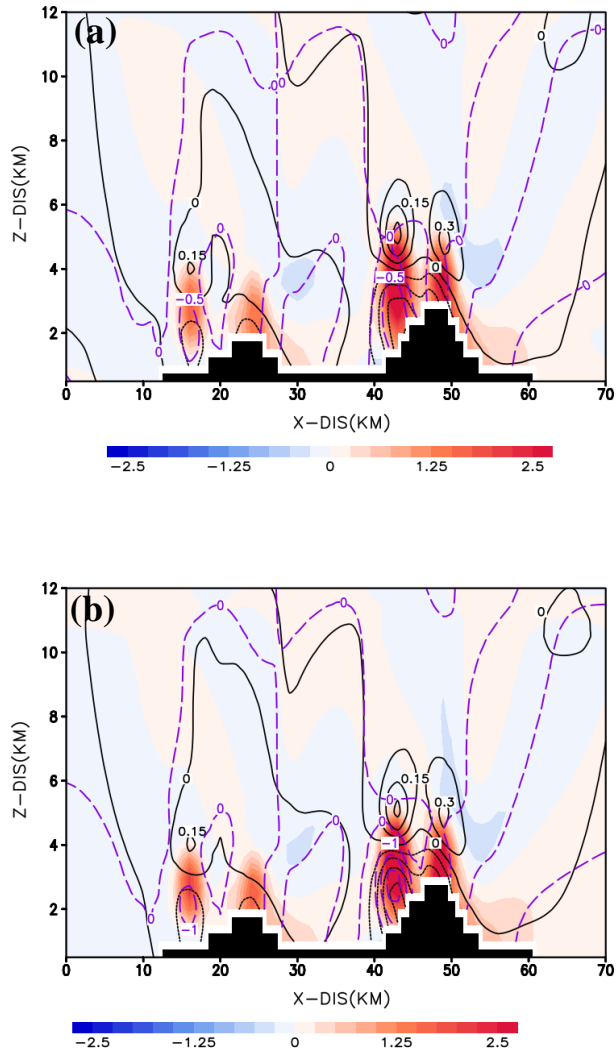


圖 6. 多山濕對流個案，為通過中心處 x-z 剖面之(a)模式輸出(視為真值)與(b)反演之壓力(等值線)與溫度(色階)擾動場。紫色虛線為源匯項(放大 10^3 倍)，用以檢視熱力方程式作為約束條件之表現。

參考文獻

- Gal-Chen, T., 1978: A method for the initialization of the anelastic equations: Implications for matching models with observations. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 587–606.
- Liou, Y.-C., 2001: The derivation of absolute potential temperature perturbations and pressure gradients from wind measurements in three-dimensional space. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **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 impacts on thermodynamic retrieval. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3992–4010.
- _____, Y.-C., S.-F. Chang, and J. Sun, 2012: An Application of the Immersed Boundary Method for Recovering the Three-Dimensional Wind Fields Over Complex Terrain Using Multiple-Doppler Radar Data, *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1603-1619.
- _____, J.-L. Chiou, W.-H. Chen, H.-Y. Yu, 2014: Improving the model convective storm quantitative precipitation nowcasting by assimilating state variables retrieved from multipleDoppler radar observations, *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 4017–4035.
- Protat, A., and I. Zawadzki, 2000: Optimization of dynamic retrievals from a multiple-Doppler radar network. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 753–760.
- Tseng, Y., and J. Ferziger, 2003: A ghost-cell immersed boundary method for flow

in complex geometry. *J. Comput. Phys.*, **192**, 593–623.

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—以臺灣地區颱風個案為例。 *大氣科學*，第 **30** 期，313–330pp。