

福衛三號反演對流層大氣溫度、 露點溫度資料與傳統探空觀測結果之比較

簡國基¹ 蔡和芳² 李湘源¹

¹ 中央氣象局氣象預報中心

² 中央氣象局氣象資訊中心

摘要

本研究利用福爾摩沙衛星三號 (FORMOSAT-3/COSMIC) 之反演資料與傳統之探空觀測資料，針對大氣對流層溫度、露點溫度進行差異比較分析，資料時段為 2006 年 8 月 1 日至 2007 年 5 月 31 日，樣本點選取條件為 FORMOSAT-3/COSMIC 反演點與傳統探空觀測點兩者間距離小於 150 公里者，符合此選取條件之研究樣本點共有 1081 個。其中，FORMOSAT-3/COSMIC 反演所得之露點溫度，是以美國 NCEP 數值模式的資料當作第一猜測值來進行變分運算，因此，反演之露點溫度已存在有 NCEP 數值模式的水氣場誤差。

研究結果顯示，對流層各層之溫度平均差異值皆在 1.5 K 以下，平均差異百分比約為 0.5%，相關係數達 0.98~0.99，呈現強正相關，均方根差約為 1.7~1.9 K。露點溫度相關性分析顯示，高對流層相關係數僅約 0.7~0.8，均方根差高達約 5.7 K，低對流層的相關性高於高對流層。此外，反演溫度與傳統探空溫度的差異，並不隨不同月份、不同緯度區域、或樣本點在海洋上或陸地上而有顯著變化，顯示反演溫度的資料品質相當穩定。

就低對流層大氣逆溫現象而言，福衛三號反演資料與傳統探空觀測兩者的解析結果相當一致，但以傳統探空觀測到的逆溫現象較為顯著。就低層絕對不穩定現象而言，傳統探空觀測結果亦比 FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果來得顯著。高、低對流層的溫度差比值隨緯度分布之比較結果顯示，較低緯度區 (0~20°N) 兩組資料的高、低對流層溫度差值頗為接近 (比值~1)，但中、高緯度區 (40~80°N) 的差異性較大。

關鍵詞：福爾摩沙衛星三號，反演大氣探空

一、前言

福爾摩沙衛星三號 (FORMOSAT-3) 是一台美雙邊合作計畫。其 6 個低軌道微衛星 (low-earth orbiting satellites, LEO satellites; Ware et al. 1996) 已於 2006 年 4 月 15 日順利送到離地表約 515 公里高空之暫行軌道，並預計在 22 個月期間逐漸送至離地表 800 公里的運行軌

道，執行預先規劃之科學任務。此 6 顆衛星星系酬載了全球定位系統 (Global Positioning System; GPS) 接收器，可即時接收距離地表高度約為 20200 公里，24 顆以上的 GPS 衛星之無線電訊號。

由於地球大氣之密度梯度，該無線電訊號在地球大氣傳播過程中會產生偏折，應用此原理，我們可透過架設在 6 個低軌 LEO 衛星上之

GPS接收器，即時量測無線電訊號之相位與振幅 (phase and amplitude)、搭配觀測當時之GPS與LEO衛星位置與移速等資訊，可推導出無線電訊號偏折角之垂直分布 (vertical profile of the bending angle)。在局部球對稱 (local spherical symmetry) 的假設前提下，偏折角資訊可使用Abel演算法 (Hajj et al. 1994)，進一步反演出大氣折射率 (為大氣溫度、水氣及壓力的函數) 之垂直剖面分布，以及自由電子密度隨高度之垂直分布。根據FORMOSAT-3衛星星系特性，反演得到之資料垂直解析度約為4公尺 (地表附近) 到1500公尺 (高度45公里以上) 之間，預計可提供每日全球約2500~3000個GPS掩星 (radio occultation；RO) 大氣探空資料。這些資料配合適當的資料同化模組，將可引入天氣數值模式，進行全球天氣與氣候之分析與預報，亦可做為高層大氣之電離層全球動態研究。綜合歸納其任務，美方特稱此計畫為COSMIC 計畫(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)，國際上常合稱為FORMOSAT-3/COSMIC。

大氣偏折角或大氣折射率，雖然不是一般數值天氣預報模式中的基本氣象變數，但可藉由適當的資料同化模組 (如：三維變分3DVAR或四維變分4DVAR同化)，使用運算子把模式預報的氣象參數和折射率連結起來。即可將RO資料引進天氣數值預報系統。由Eyre 1994; Healy et al. 2005; Cucurull et al. 2006 的預報實驗結果顯示，引進RO資料可提升高對流層或低平流層的溫度場預報準確度約7%，但分析中對流層以下之預報結果則未見明顯改進 (Healy et al. 2005)。Huang et al. (2005) 同化數點CHAMP折射率探空，發現對侵台颱風路徑及雨量預報皆有正面的影響。除數值天氣模式外，FORMOSAT-3/COSMIC大氣觀測資料也可提供天氣預報員即時的大氣剖面分布，由RO資料進一步反演所得到之大氣溫度、溼度分布，可幫助預報員瞭解全球大氣的溫溼結構，有效補

強傳統探空觀測較為缺乏 (如：洋面地區) 的問題。然而，利用RO資料反演所得之大氣溫度、溼度必須有系統的評估與比較，尤其，反演計算過程中，常存在許多假設、簡化或近似，這些問題都可能造成反演結果的誤差，因此，瞭解、比較反演產品之特性及其與觀測資料之差異，為有效利用RO資料進行天氣預報的首要工作。

FORMOSAT-3衛星成功升空後，觀測資料隨即同步傳送至中央氣象局，經過約2~3個月的運行，資料分布區域逐漸擴展、資料量也逐漸增多，本研究選取2006年8月1日~2007年5月31日時段，針對北半球每天00 UTC及12 UTC，逐日比較 FORMOSAT-3/COSMIC 所反演之大氣溫度、露點溫度與傳統大氣探空 (radiosondes, hereinafter, RS) 觀測結果的差異。全球大氣 RS 觀測資料是數值天氣模式與氣候監測研究的重要資訊，一般而言，傳統 RS 觀測可提供地表至約30公里高空之氣壓、溫度、溼度、風等大氣要素；在實驗室測試條件下 (laboratory condition)，RS 資料的精確度達：氣壓 0.5 hPa，溫度 0.2 K，相對溼度 2%左右 (Vaisala 1991)，但實際進行大氣觀測的誤差數值較大，且高度愈高，誤差數值愈大。以溫度觀測為例，10公里高空誤差約達1 K，30公里高空誤差更可高達4 K (Ware et al. 1996)；此外，RS 溼度觀測誤差比溫度觀測誤差更為顯著，尤其在溫度低於0°C的高對流層大氣 (如：500 hPa以上) RS 溼度觀測誤差可能達15%以上 (Dzingel and Leiterer 1995)，此誤差的主因在於冰狀雲滴會影響 RS 溼度儀器的量測準確度 (Leiterer et al. 1997)。儘管 RS 之大氣溫度、溼度資料可能存在上述問題，但該資料仍然是現階段可與 FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果直接進行比較的最佳觀測產品。值得一提的是，既然 RS 資料在高對流層極可能存在些許誤差，本研究分析比對之目的在於討論傳統探空資料與 FORMOSAT-3/COSMIC 反演產品之

差異，該差異可能來自 RS 觀測誤差、FORMOSAT-3/COSMIC 觀測誤差、亦可能來自反演計算之演算方法；比對結果的分析與討論，可提供數值天氣預報進行資料同化時、以及研發利用福衛三號資料反演大氣溫度、溼度演算方法時之參考。本文第二節將扼要說明現行 FORMOSAT-3/COSMIC 觀測資料反演計算大氣垂直剖面之演算方法；第三節分析比較 FORMOSAT-3/COSMIC 反演探空與傳統探空觀測之溫度、露點溫度差異；第四節綜合討論並總結主要研究結論。

二、福衛三號觀測資料反演計算 大氣垂直剖面之演算法

FORMOSAT-3/COSMIC 反演大氣溫度、溼度垂直剖面，必須使用的各項資料包括：RO 觀測時間、GPS 和 LEO 衛星的座標與速度、雙頻超量相位 (L1 and L2 excess phase) 和電碼的訊噪比 (SNR)，這些資訊可估算出偏折角 (bending angle) 及射距離 (impact parameter)；再以局部球對稱 (local spherical symmetry) 為假設前提，反演出大氣折射率 (refractivity, N)、壓力 (pressure, P)、溫度 (temperature, T) 及水氣壓 (water vapor pressure, Pw) 等剖面資料，下列以 12 個步驟簡述演算過程，詳細的演算原理與理論可參見 Kuo et al. (2004)。

1. 逆排上升掩星資料變成下降掩星資料：為資料處理方便，一律將上升掩星 (rising occultation) 資料逆排成為下降掩星 (setting occultation) 資料。
2. 去除雜訊：包含兩項工作，一是偵測 L1 都卜勒頻移量 (Doppler frequency shift) 誤差；二是截除誤差太大的訊號，保留其餘的部分。L1 是 GPS 雙頻相位資料之一。偵測的方式是比較平滑後之 L1 都卜勒頻移量 (等於超量相位的時間微分) 以及模式之都卜勒頻移量。若其差值夠大，就表示前者有相當大的追縱誤差 (tracking error，例如多路徑效

應)。其中模式值是根據 GPS 和 LEO 衛星軌道的座標和速度，以及折射氣候學 (refractivity climatology；以 CIRA+Q 氣候模式為基礎，參見 Kirchengast et al. 1999) 模擬出來的。對 FORMOSAT-3/COSMIC 而言，L1 的超量都卜勒頻移的變化量必定在 ± 10 Hz 之間。因此當此差值超過 5 Hz 時，就被認定誤差過大。訊號會在稍早的時間被截斷 (詳見 Sokolovskiy 2001)。

3. 開環 (open loop) 資料的演算：在訊號通過熱帶低對流層時，常受劇烈的折射率梯度影響而產生頻散，因此須以開環技術解決，以取得低對流層資訊，參見 Sokolovskiy (2001)。演算步驟包括：
 - (1) 檢測開環資料的訊噪比
 - (2) 計算都卜勒模式積分之相位值
 - (3) 以降頻轉換後的掩星訊號之滑動頻譜 (sliding spectrogram) 來修正都卜勒模式
 - (4) 連結樣本之間的超量相位 (計算累積的相位)
 - (5) 驗證接收器模式 (比對接收器都卜勒模式與以 CIRA+Q 氣候學為基礎所得到的都卜勒模式，藉以驗證之)
4. 平滑 L1、L2 超量相位並計算超量都卜勒頻移：儘管切除誤差過大的部分，剩餘之 L1、L2 掩星訊號誤差，仍有可能造成訊號相位不在反演之球對稱假設的範圍之中。換言之，以幾何光學近似法計算其都卜勒頻移量所得的偏折角是射距離 (impact parameter) 的多值函數，而多值函數並不能經由 Abel 反演法來反演。因此，在以幾何光學法計算偏折角和射距離之前，此誤差必須從超量相位中濾掉。在此選用兩種濾波方法如下。兩者都可得都卜勒頻移量的解析解。
 - (1) 傅利葉濾波：將相位觀測資料提供給傅利葉轉換。首先，將頻譜乘上高斯曲線的窗區函數。由輸入的參數決定窗區的

寬度。反演轉換的頻譜就變成平滑的相位。此平滑窗區跟頻譜窗區的寬度呈負相關。其二，頻譜乘上窗區函數以及頻率的虛數部分。然後反演轉換的頻譜就變成平滑的相位導數（都卜勒頻移量）。原始相位資料末端的不連續會因頻譜的失真，而使平滑函數在接近末端的地方惡化。為減少這種效應，在傅利葉轉換前，原始相位的末端會先被平滑外插至常數 0。

- (2) 曲線回歸 + 傅利葉濾波：這個方法不需要外插。相位主要的走勢用三次曲線回歸 (cubic spline regression) 去除。然後將殘存的相位（在零附近，而且末端也沒有很大的不連續）放入傅利葉濾波器計算殘存的都卜勒量。曲線回歸的導數是以三次多項式的微分進行解析計算的。於是都卜勒量等於都卜勒量經曲線回歸和濾波後的殘量所得到的都卜勒量之總和。
5. 計算掩星點的經緯度、掩星平面方位角和橢球曲率中心（幾何光學法）：其演算步驟分成下列 3 項：
 - (1) 由都卜勒頻移量計算 L1 的偏折角 (bending angle) 和射距離 (impact parameter)。初步估計地球慣性坐標中的偏折角和射距離，以便後續估計掩星點。
 - (2) 估計掩星點坐標和掩星平面方位角。掩星平面定義為參考坐標原點到 GPS 和 LEO 衛星的向量 (r_1^σ 和 r_2^σ) 所構成的平面。掩星點 (occultation point) 是一掩星剖面的代表點，近似於 L1 超量相位接近 500 公尺的 GPS-LEO 連心線上之切點。該點平均高度為 3~4 公里。而從座標原點到掩星點的向量 r_{tp}^σ 是以 r_2^σ 朝向 r_1^σ 旋轉 $\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} - \phi_2$ 來計算的（在此已假設局部球對稱）。其中 ϕ_2 為射線在 r_2^σ

的天頂角。掩星點在此以地心慣性 (ECI) 坐標之大地 (geodetic) 經緯度來表示（見圖 1）。掩星點上的掩星平面方位角定義為：北方和 GPS 衛星方向的夾角（由北朝東為正）。

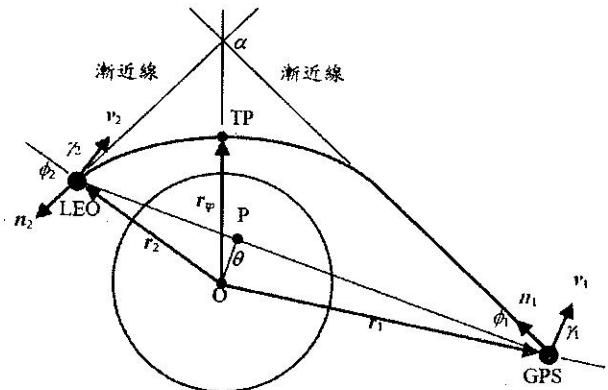


圖 1：掩星幾何關係圖。掩星平面定義為 GPS、LEO 和 O 三點之共面。曲線為電波路徑；TP 為掩星點；P 為 GPS-LEO 連心線切點；O 點為電波路徑在 TP 的曲率中心； r_1 、 r_2 和 r_{tp} 為 GPS、LEO 和 TP 向量； n_1 和 n_2 為電波路徑上兩漸近線的單位向量； v_1 、 v_2 為 GPS、LEO 速度向量在掩星平面上的分量； γ_1 、 γ_2 為兩速度分量的天頂角； ϕ_1 、 ϕ_2 為射線在 GPS 和 LEO 的天頂角； α 為 GPS 和 LEO 的圓心角，即 r_1 、 r_2 的夾角；當 α 趨近於 0 時，TP 和 P 幾乎重合。

Fig. 1. Schematic diagram showing the GPS-LEO radio occultation observations.

- (3) 計算橢球曲率中心。在球對稱假設之下，地球扁率可能引入相當的反演誤差 (Syndergaard, 1998)。為了減小這種誤差，將參考坐標原點由地心移至橢球曲率中心。因曲率中心在經度和緯度方向不同，故將局部球中心 (local center of sphericity) 定義為掩星平面方向上的掩星點之曲率中心，而將 GPS 和 LEO 衛星

的坐標原點移至曲率中心。

- (4) 轉換至地心地固 (ECF) 坐標。將掩星射線切點之坐標由 ECI 坐標轉至 ECF 坐標。
- (5) 計算掩星平面法向量。取 GPS 衛星向量與 LEO 衛星向量之外積，得掩星平面之法向量。再依 z 軸旋轉 $\Delta\theta$ ，至 ECF 坐標上，再取單位向量，成為地固坐標上的掩星平面單位法向量。
6. 以幾何光學法 (geometric optics, GO) 計算偏折角：由都卜勒頻移量計算偏折角和射距離之幾何光學法是假設電波只以單一射線由發射端 (GPS) 傳送至接收端 (LEO)。在多溼的對流層以上，因為多路徑效應不大，所以這個假設是合理的。在發射端和接收端，都卜勒頻移量和射線天頂角之間的關係，可寫成下列：
- $$\frac{f + f_{dop}}{f} = \frac{1 - n_2^\sigma \cdot v_2^\sigma / c}{1 - n_1^\sigma \cdot v_1^\sigma / c} = \frac{c - v_2 \cos(\gamma_2 - \phi_2)}{c - v_1 \cos(\gamma_1 - \phi_1)} \quad (1)$$
其中 f 和 f_{dop} 分別為電波頻率和都卜勒頻率； $n_{1,2}^\sigma$ 為發射端和接收端的射線方向向量（已乘上折射指數 1）， $v_{1,2}^\sigma$ 為掩星平面上的速度分量， γ 為速度分量的天頂角， ϕ 為射線天頂角（見圖 1）。又可由 Snell 公式：
$$r_1 n_1 \sin \phi_1 = r_2 n_2 \sin \phi_2 = a \quad (2)$$
體代求得。因此射距離 a 和偏折角 α 可由下式計算。其中 ϕ 為兩衛星之圓心角。
$$\alpha = \phi_1 + \phi_2 + \theta - \pi \quad (3)$$
7. 以電波全像術 (radio holography, RH) 計算偏折角：在多路徑效應的情況下（例如在多溼的對流層中），因為偏折角是射距離的多值函數，因此由都卜勒計算偏折角和射距離並不可行。在程式中，包含四種電波全像術，由原始複數之掩星訊號（相位和振幅）導出偏折角為射距離的函數如下；對 GPS 和近似圓形的 LEO 軌道來說，下述的第四種(FSI) 方法是處理多溼對流層中，多路徑傳播之偏

折角和射距離的最佳方式、最精確也最快速。

- (1) 倒遞法 (back propagation method, BP)
- (2) 切片頻譜法 (sliding spectral method, SS)
- (3) 正則變換法 (canonical transform method, CT)
- (4) 全波段頻譜反演法 (full spectrum inversion, FSI)

所有的電波全像術都是二維的，換言之，皆適用於掩星平面上的電磁場。但有兩個條件：(1) 發射端必須不動，即接收端接收到的是不動的電磁場；(2) 軌跡為已知量。在球對稱假設之下，發射端的軌道半徑即相當於常數。採用 CT 法需先知道接收到的電磁場在直線軌跡中的規格資訊。採用 FSI 法則需知道接收之電磁場在圓形軌跡中的規格資訊。採用全像術之前，應以 Snell 定律計算發射端和接收端的虛擬位置，以及兩者間的總相徑 (total phase path)。此法相當於處理幾何光學中的連續直線射線，因此發射端的虛擬位置即有固定的軌道半徑。對 FSI 法而言，接收端的虛擬位置也必須是固定的軌道半徑。

8. 合併 (縫合 sewing) 步驟 6 和步驟 7 之 L1 偏折角：在多溼的對流層中，多路徑效應會導致 L2 掩星訊號出現較大擾動，導致該訊號無法使用。在高度較高的地方，L2 都卜勒頻移量可能帶有瞬間的雜訊，或是在 L1 和 L2 都卜勒頻移之間有很大的平均偏量。因此上述二者可作為多路徑效應的一個指標。只要其中之一超過臨界值，計算程式就會把該高度以下，由步驟 6 計算都卜勒頻移量所得到的偏折角取代為由步驟 7 所計算得到偏折角。
9. 電離層校正：以偏折角的線性組合對掩星觀測量做電離層校正 (Vorob'ev and Krasil'nikova, 1994)，以削減電離層影響量。為了減輕 L2 雜訊所可能導致的誤差，程式採用 Rocken et al. (1997) 的線性組合如下：

$$\alpha(a) = \alpha_1(a) + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [\tilde{\alpha}_1(a) - \tilde{\alpha}_2(a)] \quad (4)$$

其中 α_1 和 α 分別是 L1 偏折角，以及校正後的偏折角； f_1 和 f_2 是 GPS 的兩種電波頻率； $\tilde{\alpha}_1(a)$ 和 $\tilde{\alpha}_2(a)$ 取自 L1 和 L2 的超量相位，經過大幅低通濾波的平滑處理（比 $\alpha_1(a)$ 的平滑窗區還大）。如此可降低 L2 雜訊所帶來的誤差。

10. 偏折角最佳化：當中性大氣偏折角的幅度和與天氣相關的訊號強度隨高度呈指數遞減時，經過濾波和電離層校正之後，其殘差大小近似常數，而使得在某個高度以上，原本的掩星訊號逐漸被此殘差所遮掩，而變得無法鑑別了。為了減輕 Abel 轉換將這個殘差由高處傳到低處的影響（即誤差傳遞），高度較高的觀測之偏折角必須被誤差較小的模式值取代，即偏折角之最佳化估計。這個最佳化在某些假設之下，將氣候模式所模擬出來的偏折角當成第一猜測值(first guess)，而最佳化之偏折角即為觀測和模式偏折角的線性組合。在此使用簡化後的價值函數（cost function）如(5)式，再取最小值，即最佳化，詳見 Kuo et al. (2004)。

$$\alpha_{opt}(a) = w_{obs}(a)\alpha_{obs}(a) + w_{guess}(a)\alpha_{guess}(a) \quad (5)$$

式中權重函數 $w(a)$ 的估計方式是由觀測誤差和第一猜測值誤差決定的。其中第一猜測值是根據折射氣候學算出來的。而兩誤差的估計來自觀測偏折角的均方根（RMS）偏差，以及第一猜測值的均方根偏差。觀測誤差主要來自高度 60 至 80 公里（因為有電離層），而猜測值誤差則在 20~60 公里之間（因為失真）。在計算觀測和猜測兩者之誤差相關性後，即可估計最佳化偏折角之權重係數。有關偏折角最佳化的原理與計算過程，可參見 Kuo et al. (2004) 之更詳細說明。

11. 反演折射率（Abel 反演法）：

由掩星觀測量計算得到最佳化的偏折角以後，若掩星的起始高度 h_0 低於 150 公里，則由第一猜測值補齊至 150 公里（即 $\alpha_{opt}(a) = \alpha_{guess}(a)$ ， $h_0 < a \leq 150 \text{ km}$ ）。接著採用 Abel 反演式（見下式）計算出折射指數。

$$n(x) = \frac{1}{\pi} \int_x^{x_{top}} \frac{\alpha_{opt}(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \quad (6)$$

式中 $x = rn(r)$ ， n 為折射指數（為在真空光速與在介質光速之比值），大氣折射率定義為 $N = 10^6(n - 1)$ 。

12. 應用一維變分法推算大氣溫度、壓力和水氣壓剖面：經驗公式如(7)式將大氣折射率與氣象參數進行連結，式中說明大氣折射率主要由水氣及乾空氣所決定 (Thayer, 1974)

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (7)$$

其中 P 和 P_w 分別代表乾空氣壓和水氣壓； T 是大氣溫度。應用一維變分法的目的是調和掩星觀測量和先驗大氣狀態，以最佳化取出大氣溫度、壓力和水氣壓剖線。模式值取自美國NCEP大氣預報資料。把掩星區域內的預報資料代入(7)式，才把得到的折射率（模式值）當作第一猜測值，然後再與步驟 11 所算出來的折射率同時進行變分分析，在最小化價值函數的運算流程下，演算出 FORMOSAT-3/COSMIC 之大氣溫度、壓力和水氣壓剖面剖線。而每次變分分析僅針對單一掩星事件。採用的一維變分法詳見 COSMIC Project Office (2005)。

三、反演探空與傳統探空觀測溫度、露點溫度之差異分析

本節進行 FORMOSAT-3/COSMIC 反演探空與傳統探空觀測溫度、露點溫度之差異分析。比較之區域與資料時段為北半球 2006 年 8 月 1 日至 2007 年 5 月 31 日，並以 FORMOSAT-3/COSMIC 反演點與傳統探空觀

測點兩者間距小於 150 公里為樣本點選取條件；依上述條件共收集到 1081 個樣本點，分布如圖 2。研究過程則就整體之表現、逐月統計、不同緯度區域統計、海洋上與陸地上差異比較、特定氣象條件等分類群組進行分析討論。

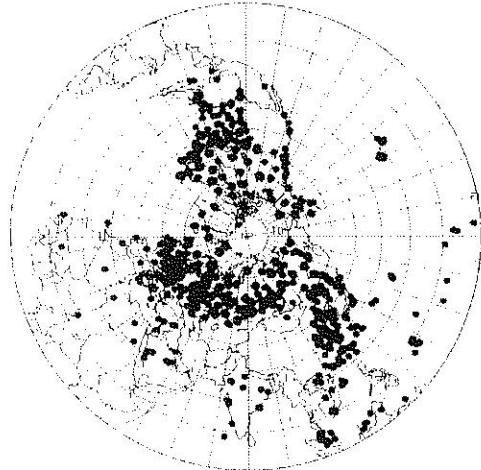


圖 2：2006 年 8 月 1 日至 2007 年 5 月 31 日，傳統大氣探空與福衛三號觀測進行比較分析之 1081 個樣本點分布圖。

Fig. 2. Geographical distribution of the samples for comparing FORMOSAT-3/COSMIC data with RS data.

1. 群組一：所有樣本點差異分析

圖 3 為平均差異值（即差異值的算數平均數）隨高度之分布。就溫度差異而言（圖 3a 中的空心圓線段），各層之平均差異值皆在 1.5 K 以下，且高層（300 hPa）的差異略小於低層者（如：925 hPa 或 850 hPa）。進一步觀察樣本點間距離小於 100 公里（915 個）、50 公里（381 個）、25 公里（110 個）的結果顯示（見圖 3b-d 的空心圓線段），平均差異值並未隨著樣本點之間距離縮短而減小，高層之溫度平均差異值仍略低於低對流層。露點溫度之平均差異（見圖 3 的實心圓線段）則較溫度平均差異高出甚多；此處必須強調，本研究水氣反演模組是以

美國 NCEP 數值模式水氣場當作第一猜測值，因此，露點溫度之差異值也隱含有 NCEP 數值模式水氣場誤差。圖 3 顯示，低對流層露點溫度差異約 2 K，高層露點溫度差異則高達 4 K 以上；樣本點之間距離縮短，露點溫度差異值亦沒有隨之減小趨勢。

高對流層溫度低於低對流層溫度可達 60 K 以上，因此，平均差異百分比（即平均差異值/該層平均值；見圖 4）也頗具統計意義。由圖 4a 可見，高、低對流層溫度的平均差異百分比皆約為 0.5%，露點溫度則由低對流層（925 hPa）的 0.8% 隨高度逐漸增大為約 2.1%（300 hPa）；樣本點間距離縮短（見圖 4b-d），除了高對流層露點溫度之平均差異百分比有略為減小（約 1.9%），其餘特徵與圖 4a 相似。

圖 5 進一步逐層比較傳統探空溫度（橫軸）與反演溫度（縱軸）間之相關性。300 hPa 的比較結果顯示（圖 5a），兩組溫度資料呈現高度正相關，相關係數達 0.982，均方根差約為 1.66 K；其他各層（圖 5b-e）之相關係數（500 hPa: 0.985, 700 hPa: 0.988, 850 hPa: 0.987, 925 hPa: 0.990）亦呈現高度正相關，均方根差（500 hPa: 1.83 K, 700 hPa: 1.70 K, 850 hPa: 1.93 K, 925 hPa: 1.90 K）與 300 hPa 的數值相當。圖 6 則為傳統探空露點溫度（橫軸）與反演露點溫度（縱軸）間之相關性，必須再次強調的是反演露點溫度已存在有 NCEP 數值模式水氣場誤差；由圖 6a 可知，300 hPa 兩組露點溫度資料的相關係數僅為 0.786，均方根差高達 5.78 K，顯示差異性頗大。隨著高度逐漸下降至低對流層，相關係數逐漸提升（500 hPa: 0.838, 700 hPa: 0.891, 850 hPa: 0.951, 925 hPa: 0.973），均方根差從 850 hPa 以下則逐漸減小（500 hPa: 6.45 K, 700 hPa: 5.84 K, 850 hPa: 3.82 K, 925 hPa: 2.93 K），可見兩組資料在低對流層的相關性高於高對流層。上述結果表示，使用 700 hPa 以上的反演大氣溼度資訊，須格外注意該資料的可信度。

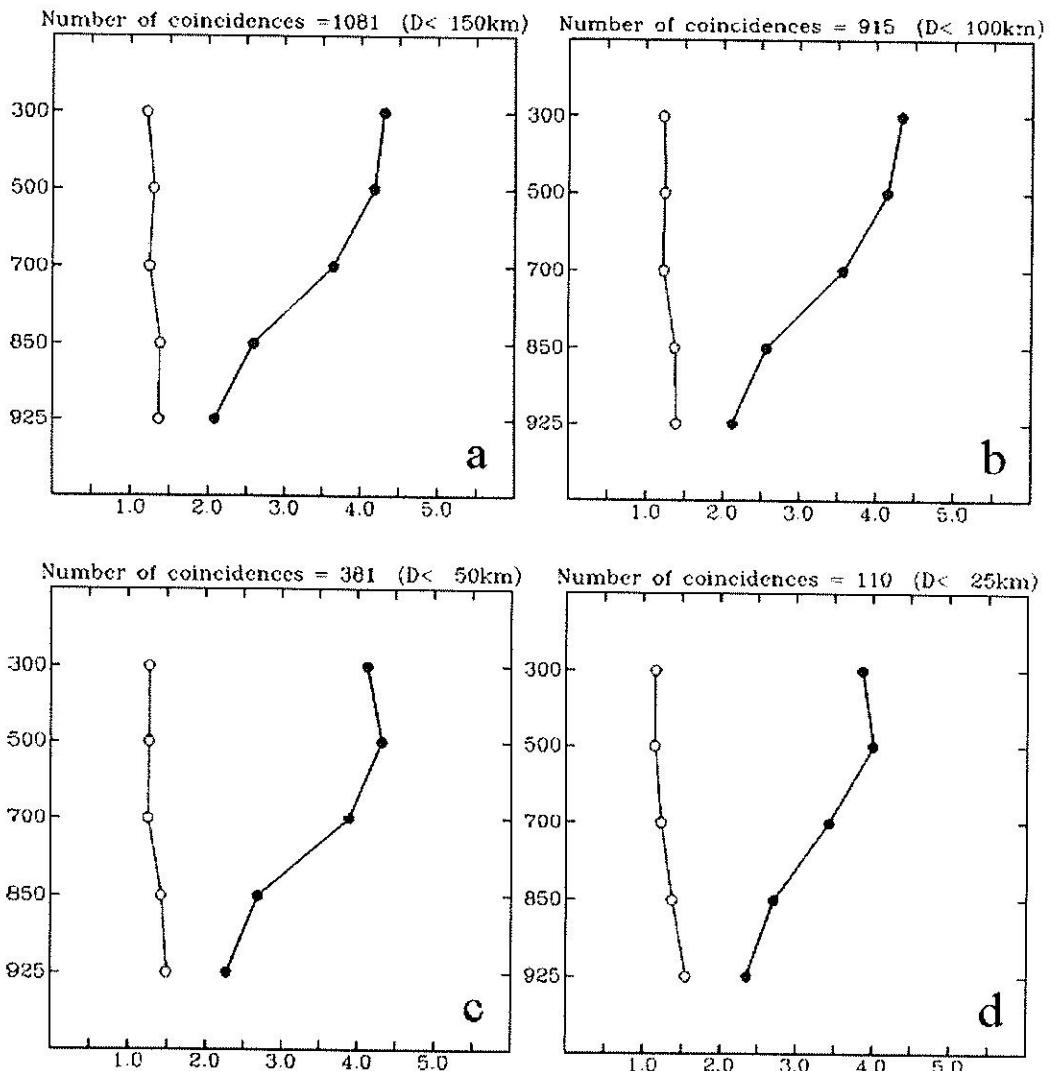


圖 3：傳統大氣探空與福衛三號資料反演溫度 (空心圓) 與露點 (實心圓) 之平均差異值 (單位： K) 隨高度 (hPa) 的分布。選取比較樣本點距離小於 (a) 150 公里，(b) 100 公里，(c) 50 公里與 (d) 25 公里。

Fig. 3. Comparison (Mean difference, unit: K) of FORMOSAT-3/COSMIC dry temperature (open circles) and dew point (filled circles) with corresponding RS data for distance less than (a) 150 km, (b) 100 km, (c) 50 km, and (d) 25 km.

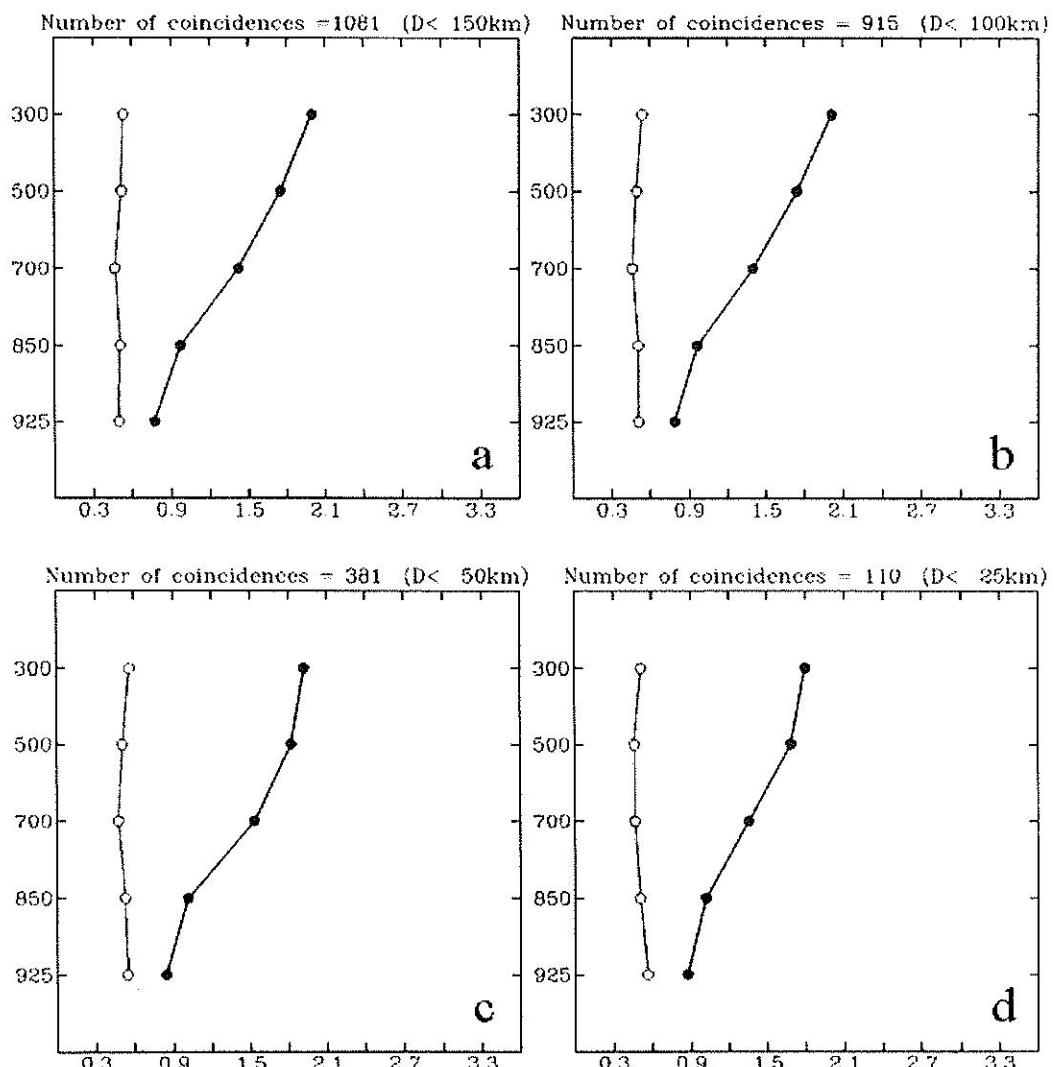


圖 4：傳統大氣探空與福衛三號資料反演溫度（空心圓）與露點（實心圓）之差異百分比（單位：%）隨高度 (hPa) 的分布。選取比較樣本點距離小於 (a) 150 公里，(b) 100 公里，(c) 50 公里與 (d) 25 公里。

Fig. 4. Comparison (Mean difference percentage, unit: %) of FORMOSAT-3/COSMIC dry temperature (open circles) and dew point (filled circles) with corresponding RS data for distance less than (a) 150 km, (b) 100 km, (c) 50 km, and (d) 25 km.

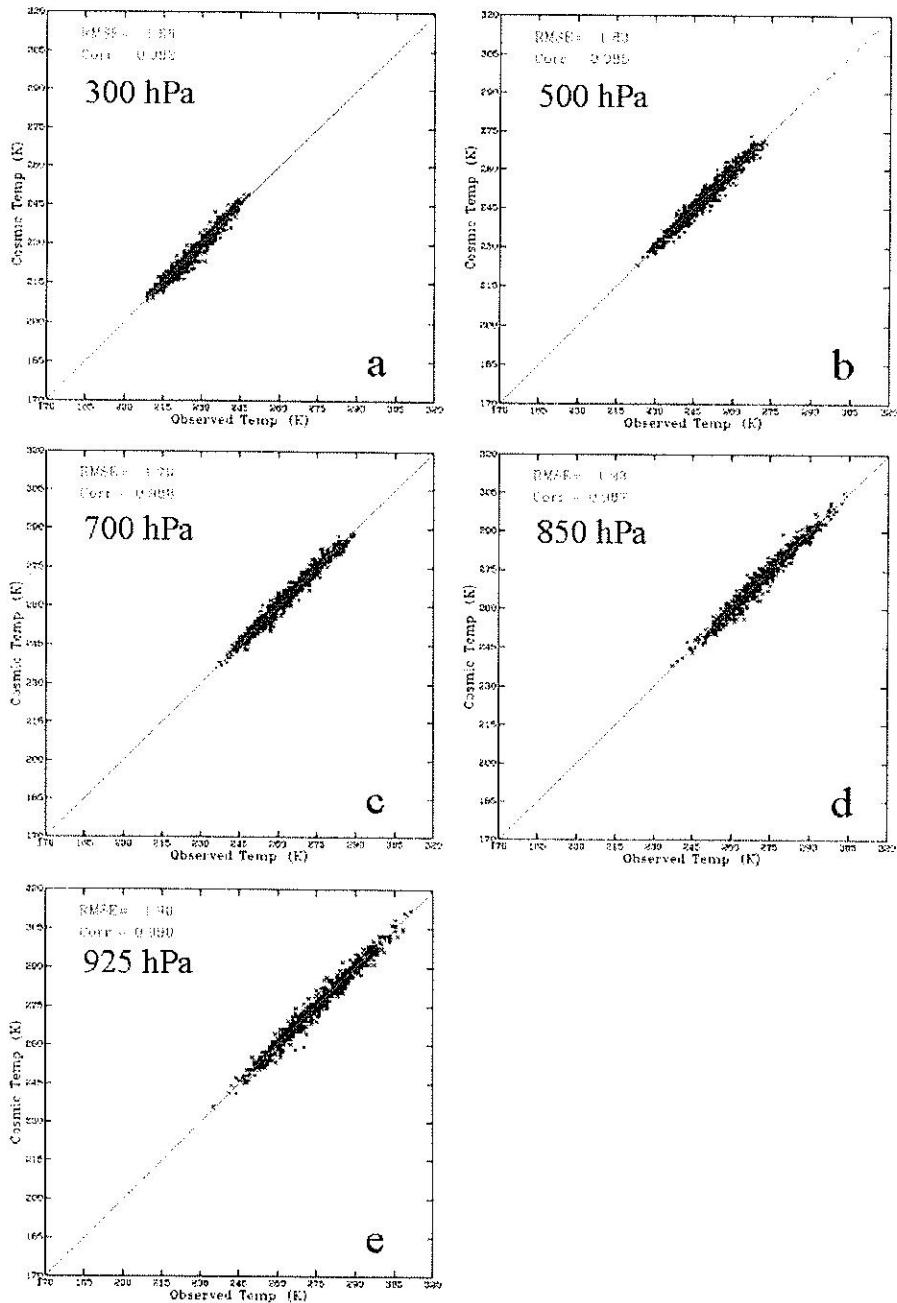


圖 5：傳統大氣探空溫度與福衛三號資料反演溫度之比較（單位：K）。(a) 300 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa 與 (e) 925 hPa (實線為 1:1 的關係線, RMSE 為均方根差, Corr.為相關係數)。

Fig. 5. Scatterplot comparing the dry temperature between RS and corresponding FORMOSAT-3/COSMIC for (a) 300 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa, and (e) 925 hPa. The root-mean-square and correlation coefficients are also shown.

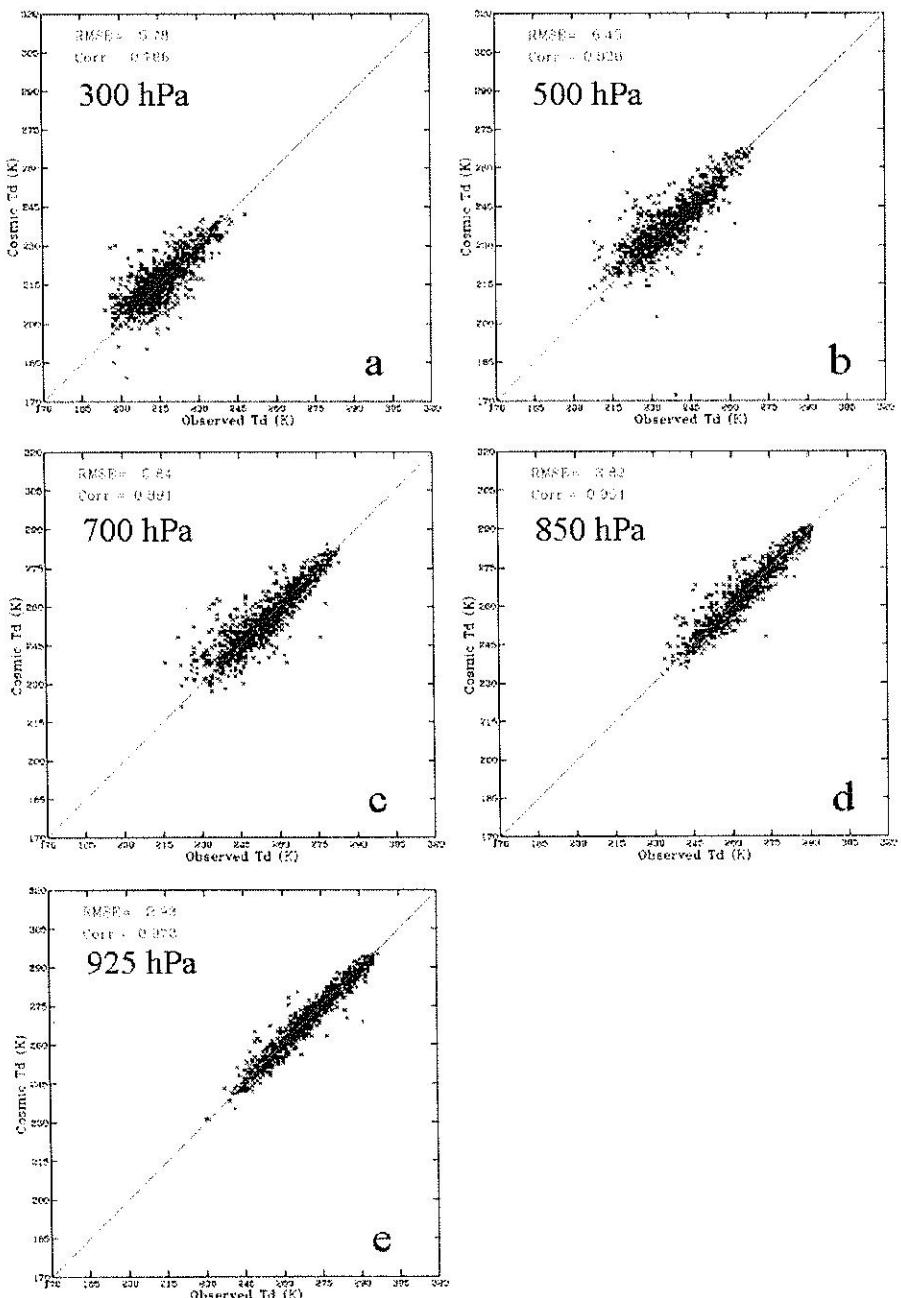


圖 6：傳統大氣探空露點溫度與福衛三號資料反演露點溫度之比較（單位：K）。(a) 300 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa 與 (e) 925 hPa (實線為 1:1 的關係線, RMSE 為均方根差, Corr. 為相關係數)。

Fig. 6. Scatterplot comparing the dew point temperature between RS and corresponding FORMOSAT-3/COSMIC for (a) 300 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa, and (e) 925 hPa. The root-mean-square and correlation coefficients are also shown.

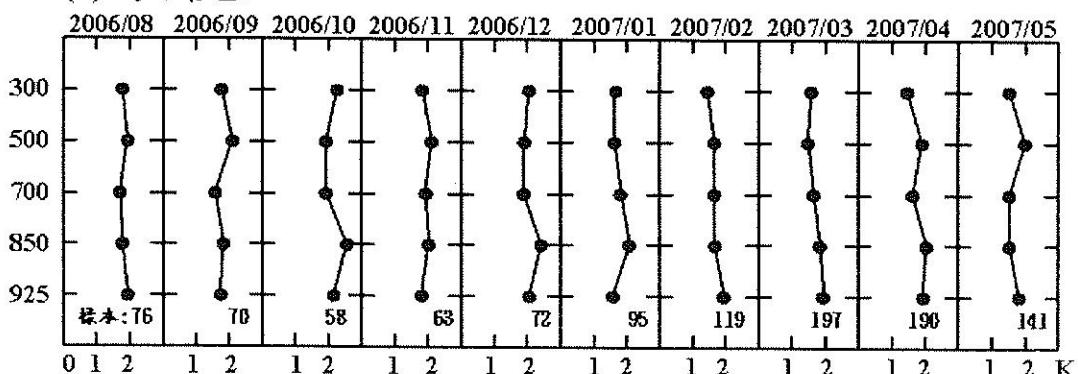
2. 群組二：逐月資料之差異分析

FORMOSAT-3 衛星成功升空後，觀測資料的分布區域逐漸擴展、資料量也逐漸增多；本小節針對 2006 年 8 月至 2007 年 5 月進行逐月差異比較，溫度差異分析如圖 7 所示。滿足選取條件的樣本點自 2007 年起顯著增多（1 月：95 個，2 月：119 個，3 月：197 個，4 月：190 個，5 月：141 個），然而，計算得到之均方根差（圖 7a）與相關係數（圖 7b）在各月份皆頗為接近，顯示反演溫度的資料品質相當穩定，樣本

數隨時間雖有增加，但與傳統探空溫度的差異並未出現顯著改變。

露點溫度差異（見圖 8）在不同月份則呈現較大的變動，某些月份傳統觀測與反演資料的均方根差較大（圖 8a）、相關係數較低（圖 8b；例如 2006 年 8 月、9 月、10 月、11 月），某些月份則相關係數較高、均方根差較小（如：2007 年 1 月、2 月），顯示反演露點溫度的資料品質相對較不穩定，且不易歸納出規律性。

(a) 均方根差



(b) 相關係數

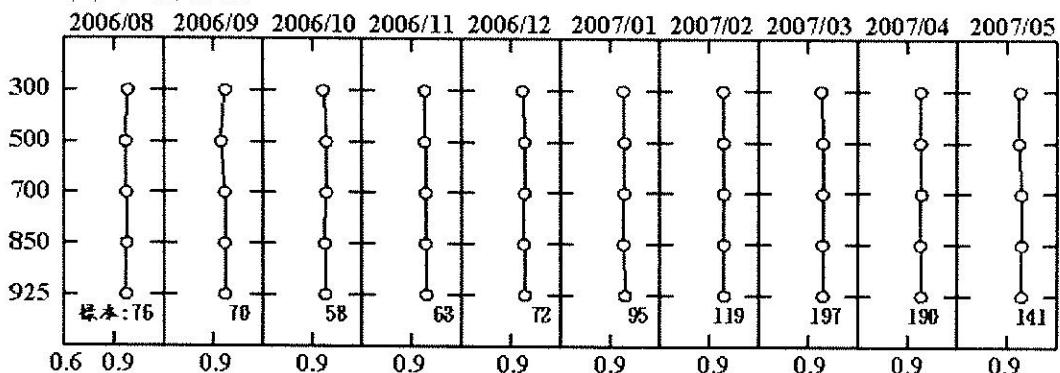
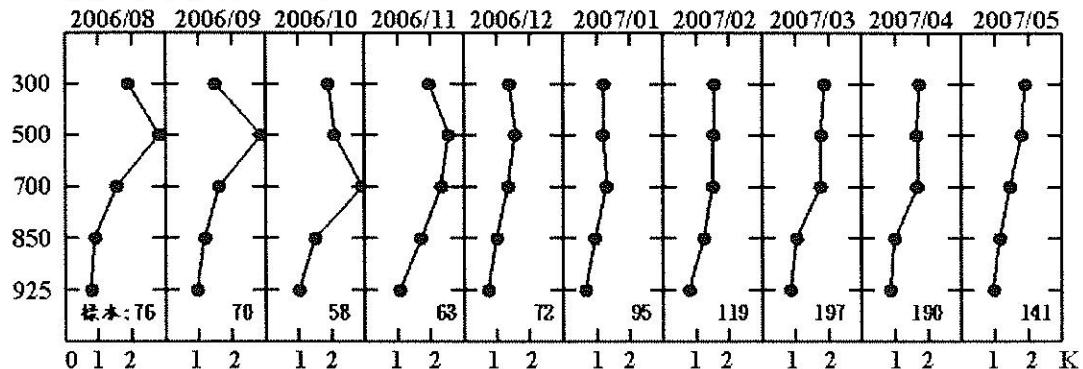


圖 7：傳統大氣探空溫度與福衛三號資料反演溫度之逐月比較 (a)均方根差，(b)相關係數。

Fig. 7. Comparison of FORMOSAT-3/COSMIC dry temperature with RS in different month for (a) root-mean-square difference and (b) correlation coefficient.

(a) 均方根差



(b) 相關係數

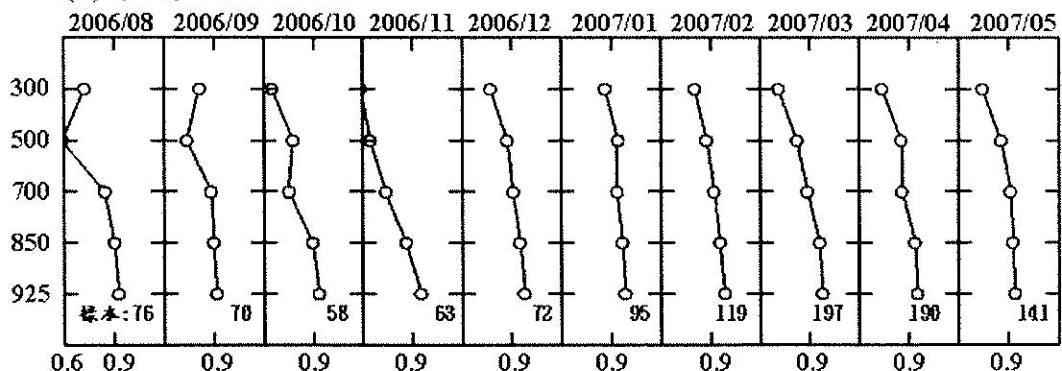


圖 8：如圖 7，但為露點溫度之比較。

Fig. 8. As Fig. 7, but for dew point temperature.

3. 群組三：不同緯度區域之差異分析

根據樣本點所在緯度，我們可將所有比較樣本區分為三類 [即緯度在 $0^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ (154 個), $30^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ (701 個), $60^{\circ}\text{N} \sim 90^{\circ}\text{N}$ (226 個)] 來進行統計分析，溫度差異分析結果如圖 9 所示，各緯度區域計算得到之相關係數 (圖 9b) 與均方根差數值 (圖 9a) 差異不大，唯低緯區中、高對流層之相關係數略較其他區域為低 (如：500 hPa 的 0.883 與 700 hPa 的 0.878)，綜合來說，傳統探空溫度與反演溫度之相關程度隨不同緯度並沒有顯著差異。

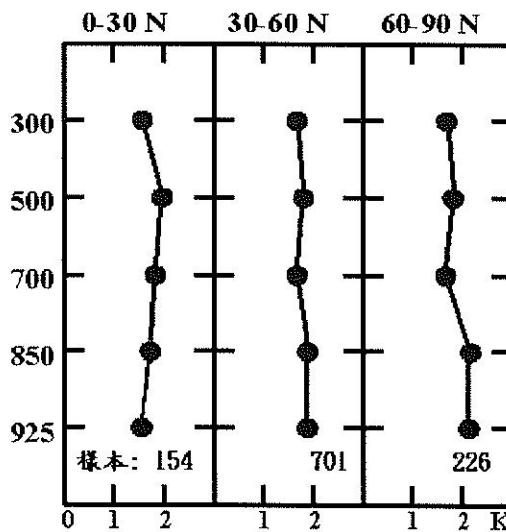
反演露點溫度與傳統探空露點溫度在中、高緯度區差異相對較小，但在低緯度區呈現出頗大差異 (見圖 10)，如：低緯度區在 (300 hPa,

500 hPa, 700 hPa, 850 hPa) 的均方根差值分別高達 (7.43 K, 9.01 K, 7.11 K, 4.76 K) (見圖 10a)、相關係數則僅為 (0.722, 0.765, 0.850, 0.871) (見圖 10b)，顯示兩組資料對低緯度大氣的水氣量資訊差異頗大；尤其，低緯度大氣蘊含大量水氣，水氣量資訊正確與否，和熱帶大氣對流、降水預報的準確性息息相關，因此，在低緯度區域應用反演露點溫度資訊亦須注意資料品質與可信度。

4. 群組四：海洋上與陸地上之差異分析

海洋上的大氣觀測資料稀少，為現階段天氣預報仍存在誤差的主要原因之一；FORMOSAT-3/COSMIC 的重點科學目標，為提高海洋地區的大氣觀測資料密度，進而提升天

(a) 均方根差



(b) 相關係數

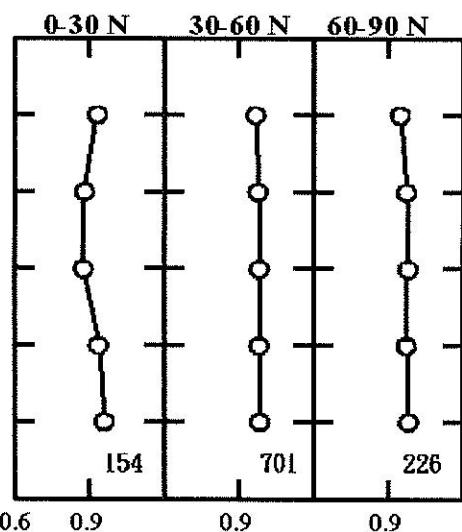
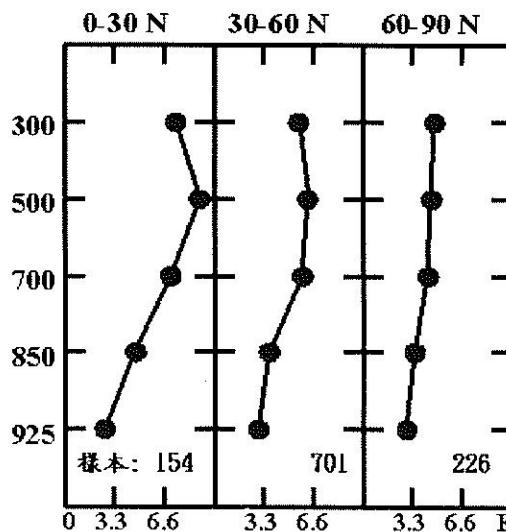


圖 9：不同緯度區域 ($0^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$; $30^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$; $60^{\circ}\text{N} \sim 90^{\circ}\text{N}$) 傳統大氣探空溫度與福衛三號資料反演溫度之比較 (a)均方根差，(b)相關係數。

Fig. 9. Comparison of FORMOSAT-3/COSMIC dry temperature with RS over different latitude regions for (a) root-mean-square difference and (b) correlation coefficient.

(a) 均方根差



(b) 相關係數

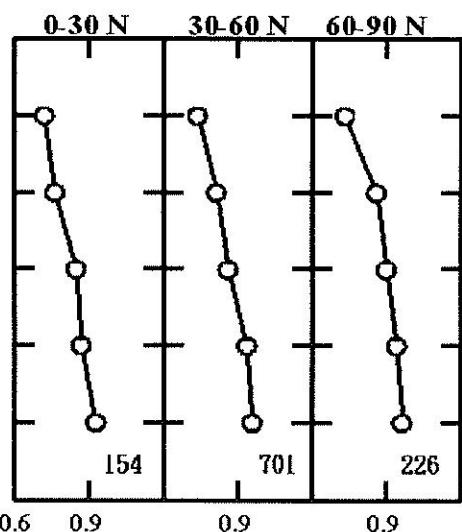


圖 10：如圖 9，但為露點溫度之比較。

Fig. 10. As Fig. 9, but for dew point temperature.

氣預報準確度。本研究將資料區分為：海洋上（海島傳統探空站，共 67 個）與陸地上（1014 個）樣本點，檢視這兩類資料反演結果之異同。溫度差異比較結果如圖 11 所示，海洋上與陸地上樣本點計算得到之均方根差數值（圖 11a）與相關係數（圖 11b）差異很小，相關係數均可達 0.98~0.99，海洋上均方根差為 1.6~2.1 K，陸地上均方根差為 1.6~2.0 K。此結果顯示，在海洋上，FORMOSAT-3/COSMIC 的反演溫度品質仍頗佳，傳統探空溫度與反演溫度之相關性，不因樣本點在海洋上或陸地上而有差異。

反演露點溫度與傳統探空露點溫度在低對流層差異不大，中、高對流層則呈現出較顯著的差異（見圖 12），如：海洋上中、高對流層在（300 hPa, 500 hPa, 700 hPa）的均方根差值分別高達（7.18 K, 7.06 K, 7.36 K），陸地上的均方根差值略小，為（5.67 K, 6.40 K, 5.72 K）（見圖

12a），顯示兩組資料對海洋上中、高對流層的大氣水氣量資訊差異頗大。低對流層之均方根差值相對較小（2~3 K）。

5. 群組五：特定氣象條件之差異分析

低對流層大氣若存在逆溫特徵，不利於深對流雲系發展，或須有更強的外在強迫機制才能促使雲、雨形成與發展；因此，檢視探空溫度資料是否具備逆溫條件，是天氣預測的重要工作之一。本研究先由傳統探空 1081 個樣本點中，挑選出 925 hPa 與 850 hPa 之間符合逆溫特徵的樣本（共有 110 個），再與 FORMOSAT-3/COSMIC 反演溫度進行比較，說明如下：

設定逆溫條件： $(T_{850} - T_{925}) > 0$

$$\text{上式可改寫為：} \left(\frac{T_{850}}{T_{925}} - 1 \right) T_{925} > 0 \quad \text{or} \quad \frac{T_{850}}{T_{925}} > 1 \quad (8)$$

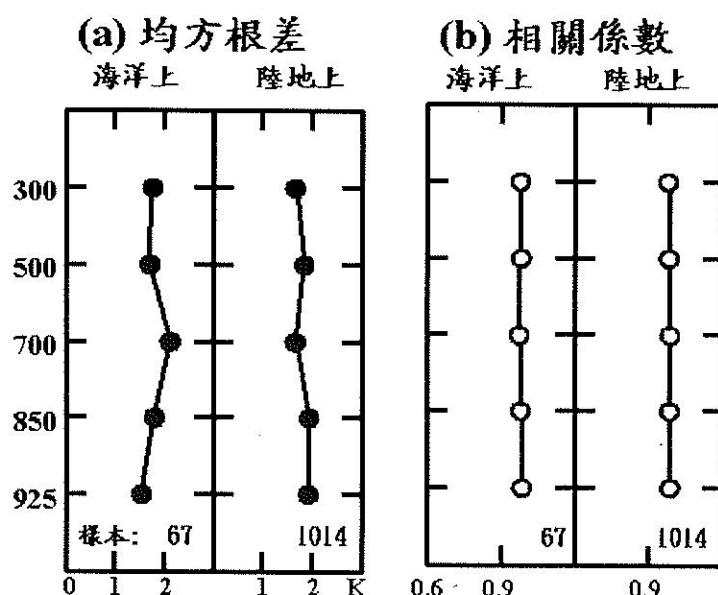


圖 11：樣本點位在海洋上及陸地上，傳統大氣探空溫度與福衛三號資料反演溫度之比較 (a)均方根差，(b)相關係數。

Fig. 11. Comparison of FORMOSAT-3/COSMIC dry temperature with RS over sea and land regions for (a) root-mean-square difference and (b) correlation coefficient.

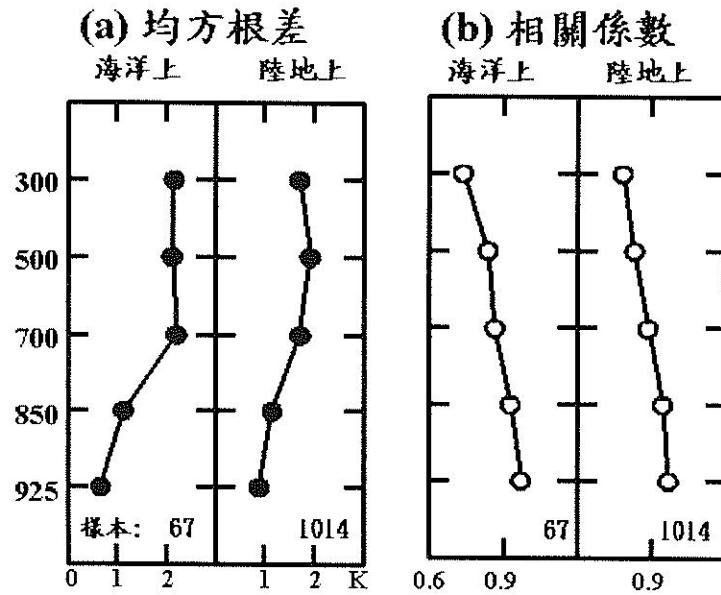


圖 12：如圖 11，但為露點溫度之比較。

Fig. 12. As Fig. 11, but for dew point temperature.

(8)式中， T_{925} 大於 0 (單位：K)，故 $T_{850}/T_{925} > 1$ 可視為判斷逆溫的條件；本研究中傳統探空溫度滿足上述逆溫條件的樣本共有 110 個，其與衛星反演結果之比較如圖 13 所示。圖中橫軸為 925 hPa 的溫度值，顯示 T_{925} 從 230 K~290 K 皆有機會出現逆溫現象；此 110 個樣本中，FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果亦滿足逆溫條件 ($T_{850}/T_{925} > 1$) 者有 85 個 (佔總數約 77.3%)，達到 $T_{850}/T_{925} > 0.99$ 條件者有 103 個 (佔總數約 93.6%)，顯示兩組資料對低對流層大氣逆溫現象的解析結果相當一致。若就 T_{850}/T_{925} 數值 (圖 13 縱軸) 分布來說，整體 FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果有略小於傳統探空觀測結果之趨勢，表示傳統探空觀測到的逆溫現象較為顯著。

另一種情況為低對流層大氣具有“絕對不穩定”特徵，地球大氣空氣塊乾絕熱上升 1 公里高度，溫度下降約 9.8 K，此溫度下降比率稱之為乾絕熱直減率；在某大氣條件下，若溫度隨高度的直減率比乾絕熱直減率為大時，只要

空氣塊些許絕熱上升，氣塊溫度就會比環境溫度高，氣塊就能夠繼續向上運動，這種情況的氣層稱為具有“絕對不穩定”，有利於深厚對流雲系統的形成與發展。假定以 925 hPa (~760gpm) 至 850 hPa (~1450gpm) 的氣層來推算，該氣層在溫度直減率大於 6.8 K 時，即滿足絕對不穩定條件，說明如下：

設定絕對不穩定條件：

$$(T_{850} - T_{925}) < -\left(\frac{1450 - 760}{1000}\right) \times 9.8$$

上式可改寫為：

$$\left(\frac{T_{850} + 6.8}{T_{925}} - 1 \right) T_{925} < 0 \quad \text{or} \quad \frac{T_{850} + 6.8}{T_{925}} < 1 \quad (9)$$

(9)式中， T_{925} 大於 0 (單位：K)，故 $(T_{850} + 6.8)/T_{925} < 1$ 可視為判斷絕對不穩定的條件；本文傳統探空溫度滿足上述條件的樣本共有 61 個，其與衛星反演結果之比較如圖 14 所示。由橫軸 925 hPa 之溫度值顯示，研究期間絕對不穩定個案大多出現於 $T_{925} > 265$ K

之區域；此 61 個樣本中，FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果亦滿足絕對不穩定條件 [$(T_{850} + 6.8) / T_{925} < 1$] 者有 19 個(佔總數約 31.1%)，達到 [$(T_{850} + 6.8) / T_{925} < 1.01$] 條件者有 56 個(佔總數約 91.8%)；由此數據可推論，傳統探空觀測到的絕對不穩定現象，比 FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果來得顯著。反演溫度對於低對流層相當不穩定之現象很可能有低估的趨勢。

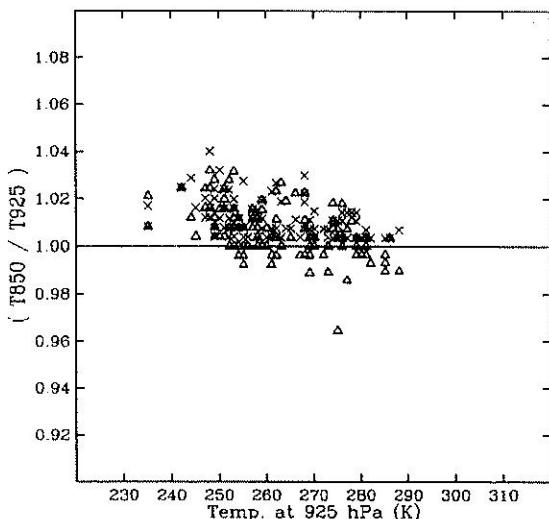


圖 13：傳統大氣探空溫度的低對流層具有逆溫特徵之樣本點（以 \times 表示；110 個）與福衛三號資料反演溫度（以 \triangle 表示）之比較。橫軸為 925 hPa 的溫度值（單位： K ）；縱軸為 850 hPa 溫度與 925 hPa 溫度之比值 (>1 代表具有逆溫特徵)。

Fig. 13. Comparison of the low-level inversion samples between RS and corresponding FORMOSAT-3 /COSMIC data.

高、低對流層的溫度差，在大氣熱力上亦隱含有穩定度的意義；當大氣環境處於不穩定狀態下，較大的溫度差，代表大氣潛在上較易發生對流性天氣系統。本文針對所有樣本點之 925 hPa 與 300 hPa 溫度差，計算 FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果與傳統探空

觀測結果之比值如下：

$$\frac{(T_{925} - T_{300})_{COSMIC}}{(T_{925} - T_{300})_{RAOB}} \quad (10)$$

(10) 式若大於（小於）1 代表 FORMOSAT-3/COSMIC 反演之溫度差高於（低於）傳統探空觀測結果，等於 1 表示兩組溫度差值相等。計算得到的比值隨緯度分布結果如圖 15 所示，在較低緯度區 ($0\text{--}20^\circ N$)，樣本點的比值相當接近 1，顯示兩組資料的溫度差值頗為接近；中、高緯度區 ($40\text{--}80^\circ N$) 兩組資料比值分布較為分散，可見相對而言，兩組資料在中、高緯度區溫度差值的差異性較大。此初步結果僅涵蓋現有 1081 個樣本點，預期未來擴充更多樣本點的研究，將可進行更詳細之比較。

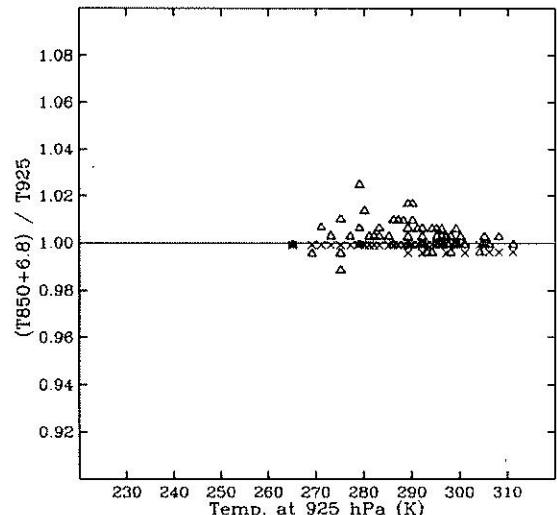


圖 14：傳統大氣探空溫度的低對流層具有絕對不穩定特徵之樣本點（以 \times 表示；61 個）與福衛三號資料反演溫度（以 \triangle 表示）之比較。橫軸為 925 hPa 的溫度值（單位： K ）；縱軸之比值 <1 代表具有絕對不穩定特徵。

Fig. 14. Comparison of the low-level absolute instability samples between RS and corresponding FORMOSAT-3/COSMIC data.

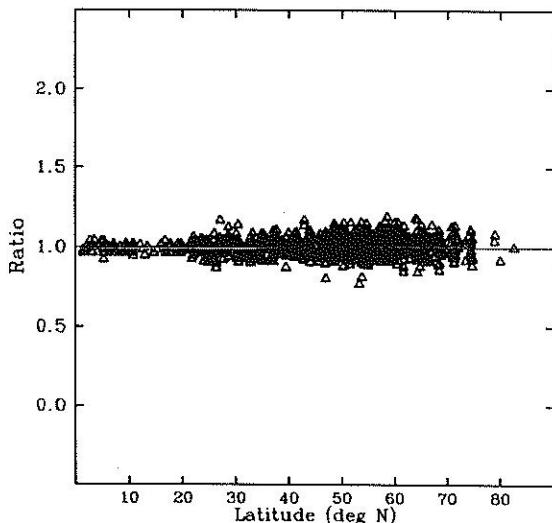


圖 15：925 hPa 與 300 hPa 溫度差比值隨緯度之分布。溫度差比值之計算為福衛三號資料除以傳統大氣探空資料 [(T925-T300)COSMIC/(T925-T300)RAO B]。

Fig. 15. Comparison of the vertical temperature differences (925 hPa and 300 hPa) between RS and corresponding FORMOSAT-3/COSMIC data.

四、討論與總結

本文選取 2006 年 8 月 1 日至 2007 年 5 月 31 日時段，針對北半球進行 FORMOSAT-3/COSMIC 反演探空與傳統探空觀測溫度、露點溫度之差異比較研究。FORMOSAT-3 已於 2006 年 4 月 15 日順利發射 6 個低軌道微衛星，此 6 顆衛星星系駕載著 GPS 接收器，即時接收位在距離地表高度約為 20200 公里的 24 顆全球定位系統 GPS 衛星之無線電訊號。由於地球大氣之密度梯度，該無線電訊號在地球大氣傳播過程中會產生偏折，應用此原理，透過架設在 6 個低軌衛星上之 GPS 接收器，可即時量測無線電訊號之相位與振幅，配合當時 GPS 與微衛星之位置與移速等資訊，可推導出無線電訊號偏折角之垂直分布。

應用 Kuo et al. (2004) 之演算法，在局部球

對稱的假設下，可利用偏折角資料反演出大氣折射率、壓力、溫度及水氣壓等大氣垂直剖面資訊；值得一提的是，FORMOSAT-3/COSMIC 反演大氣溼度資訊，是以美國 NCEP 數值模式的資料當作第一猜測值來進行變分運算，因此，反演所得之溼度資訊，已存在有 NCEP 數值模式的水氣場誤差，使用上須格外注意。本研究以 FORMOSAT-3/COSMIC 反演點與傳統探空觀測點兩者間距小於 150 公里為樣本點選取條件；依此條件於研究期間共收集到 1081 個樣本點，分析過程以整體表現、逐月統計、不同緯度區域統計、海洋上與陸地上差異統計、特定氣象條件等群組，就大氣對流層之溫度與露點溫度進行比較，研究結果綜合歸納如下。

- 所有樣本點差異分析結果顯示，各層之溫度平均差異值皆在 1.5 K 以下，且高層 (300 hPa) 的差異略小於低層者，平均差異百分比皆約為 0.5%；平均差異值並未隨著樣本點間的距離縮短而減小。由相關性分析可見，FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果與傳統探空觀測溫度呈現高度正相關，相關係數可達 0.98~0.99，均方根差約為 1.7~1.9 K。露點溫度相關性分析顯示，300 hPa 相關係數僅為 0.786，均方根差高達 5.78 K，表示兩組資料差異性頗大。隨著高度逐漸下降至低對流層，相關係數逐漸提升 (500 hPa: 0.838, 700 hPa: 0.891, 850 hPa: 0.951, 925 hPa: 0.973)，均方根差從 850 hPa 以下則逐漸減小 (500 hPa: 6.45 K, 700 hPa: 5.84 K, 850 hPa: 3.82 K, 925 hPa: 2.93 K)，露點溫度資料在低對流層的相關性高於高對流層。
- 逐月資料之差異分析顯示，相關係數與均方根差數值在研究期間各月份皆頗為接近，顯示反演溫度的資料品質相當穩定，並未隨時間有明顯變動。露點溫度差異在不同月份則相對有較大的變動，某些月份傳統觀測與反演資料的相關係數較低、均方根差較大

- (如：2006 年 8 月、9 月、10 月、11 月)，某些月份則相關係數較高、均方根差較小(如：2007 年 1 月、2 月)，顯示反演露點溫度的資料品質相對較不穩定。
3. 不同緯度區域之差異分析顯示，溫度在各緯度區域計算得到之相關係數與均方根差數值差異不大，表示傳統探空溫度與反演溫度隨不同緯度並沒有顯著差異。反演露點溫度與傳統探空露點溫度在高緯度區差異相對較小，但在低緯度區的差異頗大 (300 hPa, 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa 的均方根差值分別高達 7.43 K, 9.01 K, 7.11 K, 4.76 K、相關係數僅為 0.722, 0.765, 0.850, 0.871)。
 4. 樣本點在海洋上與陸地上之差異分析顯示，溫度差異值相當小，海洋上均方根差為 1.6~2.1 K，陸地上均方根差為 1.6~2.0 K，相關係數均可達 0.98~0.99。可見在海洋上，FORMOSAT-3/COSMIC 的反演溫度品質仍頗佳。露點溫度在低對流層差異不大，中、高對流層則呈現出較顯著的差異，海洋上中、高對流層在 (300 hPa, 500 hPa, 700 hPa) 的均方根差值分別高達 (7.18 K, 7.06 K, 7.36 K)，陸地上為 (5.67 K, 6.40 K, 5.72 K)。
 5. 由傳統探空溫度滿足低對流層逆溫條件的樣本比較結果顯示，FORMOSAT-3/ COSMIC 反演結果亦滿足逆溫條件 ($T_{850}/T_{925} > 1$) 者佔總數約 77.3%，達到 $T_{850}/T_{925} > 0.99$ 條件者佔總數約 93.6%，顯示兩組資料對低對流層大氣逆溫現象的解析結果相當一致，歸納而言，傳統探空觀測到的逆溫現象較為顯著。
 6. 由絕對不穩定 [$(T_{850}+6.8)/T_{925} < 1$] 的樣本比較結果顯示，FORMOSAT-3/ COSMIC 反演結果亦滿足絕對不穩定條件者佔總數約 31.1%，達到 [$(T_{850}+6.8)/T_{925} < 1.01$] 條件者佔總數約 91.8%；傳統探空觀測到的絕對不穩定現象，比 FORMOSAT-3/COSMIC 反演結果來得顯著。
 7. 由高、低對流層的溫度差比值隨緯度分布之比較結果顯示，較低緯度區 ($0\text{--}20^\circ\text{N}$)，兩組資料的溫度差值頗為接近 (比值~1)；中、高緯度區 ($40\text{--}80^\circ\text{N}$) 兩組資料比值分布較為分散，相對而言，兩組資料在中、高緯度區溫度差值的差異性較大。
- 比較 NCEP 水氣背景場與傳統探空水氣觀測結果之差異，是本研究重要的未來工作之一；此項工作將可幫助我們瞭解，NCEP 水氣場誤差是否為導致 FORMOSAT-3/COSMIC 反演露點溫度差異的主要來源。未來亦可嘗試使用不同模式資料當作水氣反演背景場，期望能降低其與傳統探空觀測水氣量之差異。

五、致謝

非常感謝兩位審查者精闢的建議與指正。本文是在中央氣象局氣象預報中心自行研究發展計畫支持下完成，資料來源為中央氣象局資訊中心，所有樣本比對之探空圖檔是由 WINS 系統輸出 (本研究已另行存檔)，特致誠摯之謝忱。

參考文獻

- COSMIC Project Office, 2005: Variational atmospheric retrieval scheme (VARS) for GPS radio occultation data, <http://tacc.cwb.gov.tw/cdaac/doc/documents/1dvar.pdf>
- Cucurull, L., Y.-H. Kuo, D. Barker, and S. R. H. Rizvi, 2006: Assessing the Impact of Simulated COSMIC GPS Radio Occultation Data on Weather Analysis over the Antarctic: A Case Study. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 3283–3296.
- Dzingel, M., and U. Leiterer, 1995: Untersuchungen über Genauigkeit und Korrekturmöglichkeiten für die Feuchtesindierung mit dem A-Humicap der

- Sonde RS-80, *Technical Report, Meteorologisches Observatorium Lindenbergy*.
- Eyre, J. R., 1994: Assimilation of radio occultation measurements into a numerical weather prediction system. ECMWF Tech. Memo. 199, 34 pp.
- Hajj, G. A., E. R. Kursinski, W. L. Bertiger, L. J. Romans, and K. R. Hardy, 1994: Assessment of GPS occultations for atmospheric profiling. Preprints, *Seventh Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography*, Monterey, CA, Amer. Meteor. Soc., J7–J10.
- Healy, S. B., A. M. Jupp, and C. Marquardt, 2005: Forecast impact experiment with GPS radio occultation measurements. *J. Geophys. Res.*, **32**, L03804, doi:10.1029/2004GL020806.
- Huang, C.-Y., Y.-H. Kuo, S.-H. Chen and F. Vandenbergh, 2005: Improvements on typhoon forecast with assimilated GPS occultation refractivity. *Weather and Forecasting*, **20**, 931–953.
- Kirchengast, et al., The CIRA-86&Q_UoG model, 1999: An extension of the CIRA-86 monthly tables including humidity tables and a Fortran 95 global moist air climatology model, Eur. Space Agency, IMG/UoG Techn. Rep., 8.
- Kuo, Y.-H., T.-K. Wee, S. Sokolovskiy, C. Rocken, W. Schreiner, D. Hunt, and R. A. Anthes, 2004: Inversion and error estimation of GPS radio occultation data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 507–531.
- Leiterer, U., H. Dier, and T. Naebert, 1997: Improvements in radiosonde humidity profiles using RS-80/RS-90 Radiosondes of Vaisala, *Beitr. Phys. Atmosph.*, **4(70)**.
- Rocken, C., et al., 1997: Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **102(D25)**, 29,849-29,866.
- Sokolovskiy, S.V., 2001: Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit, *Radio Sci.*, **36(3)**, 483-498.
- Syndergaard, S., 1998: Modeling of the effect of the Earth's oblateness on the retrieval of temperature and pressure profiles from libm sounding, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **60**, 171-180.
- Vaisala, 1991: Users guide ozone sonde OES. Vaisala Oy, Helsinki.
- Vorob'ev, V.V. and T.G. Krasil'nikova, 1994: Estimation of accuracy of the atmospheric refractive index recovery from Doppler shift measurements at frequencies used in the NAVSTAR system, *Izv. Russ. Acad. Sci., Atmos. Ocean. Phys., Engl. Transl.*, **29**, 602-609.
- Ware R., Coauthors, 1996: GPS sounding of the atmosphere: Preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 19–40.

Comparison of Temperature and Dew Point Temperature Derived from FORMOSA-3/COSMIC Data and Observed from radiosondes

Guo-Ji Jian¹, Ho-Fang Tsai², and Shian-Yuan Lee¹

¹Weather Forecast Center, Central Weather Bureau

²Meteorology Information Center, Central Weather Bureau

ABSTRACT

Sounding profiles derived from FORMOSAT-3/COSMIC GPS radio occultation measurements are compared with data from the Northern Hemisphere radiosonde network. FORMOSAT-3/COSMIC data between August 1, 2006 and May 31, 2007 are used for the comparisons. Note that the dew point temperature from FORMOSAT-3/COSMIC includes the NCEP humidity errors since the NCEP data was used as the first guess fields to get the dew point profiles.

The mean difference and the mean difference percentage of dry temperature are practically independent of the compared pressure levels with ~1.5 K and ~0.5%. The correlation coefficient and root-mean-square difference between the FORMOSAT-3/ COSMIC temperature and RS (radiosondes) temperature are 0.98~0.99 and 1.7~1.9 K, respectively. Poor performance of dew point temperature in the higher troposphere, of which of correlation coefficient and the root-mean-square are 0.7~0.8 and 5.7 K, indicates significant differences between the derived data and RS data on water vapor information. Good agreement in low-level inversion, where temperature increases with height from 925 hPa to 850 hPa, is observed with a percentage difference of about 6.4 %. However, less agreement in low-level static instability, of which the lapse rate is greater than the adiabatic lapse rate from 925 hPa to 850 hPa, is found since more stable results are shown in the derived FORMOSAT-3/COSMIC temperature.

Key words: FORMOSAT-3/COSMIC, Atmospheric sounding profiles