

運用 AVHRR 資料於一維變分反演 TOVS 觀測的實驗

周 鑑 本^{1 2}

¹ 中央氣象局衛星中心

² 國立中央大學大氣物理研究所

(中華民國八十七年十一月十三日收稿；中華民國八十七年十二月三十一日定稿)

摘 要

變分反演法是日前使用十分普遍的方法，並可推廣至三維、四維的情況。然而目前主要仍是晴空視場的處理為主，但是衛星觀測中有雲的視場仍佔有不少的比例。Eyre(1989)在其模擬研究中指出，較精確的雲參數初始猜值可降低一維變分反演雲遮視場時的計算的疊代次數，甚至對反演能否收斂亦有影響。本文的目的即在研究以 AVHRR 資料提供較精確的雲參數始猜值對於一維變分反演真實 TOVS 雲遮視場之影響。

實驗的結果顯示，對於全雲遮的個案而言，76%的個案收斂成功，部分雲遮的情形則有88%的個案反演收斂。而疊代計算次數在兩種情形下平均都在 5 次以內。AVHRR 資料對於反演雲參數是有助益的，對於反演溫、溼剖面的影響則是不明顯的。由於使用 AVHRR 資料使我們對於雲參數的掌握比較精確，可以將有雲的視場加以分類討論。在全雲遮的情形下，當雲高在 1000hPa 到 900hPa 時，其溫、溼剖面反演的結果與晴空時類似，在背景溫度剖面已十分精確(均方根誤差 0.5K 到 1.0K)的情形下，仍有微量(0.2K)的改進在 500hPa 到 900hPa 之間。而水汽(g/Kg)可減少背景場誤差均方根對數值 0.06，隨雲高上升，反演結果受到限制，當雲高 800hPa 以上，水汽與溫度的反演結果皆不明顯。而在部分雲遮的情形下，雲高在 800hPa 以下，及雲高在 800hPa 以上但雲量較小(< 0.35)時，也能得到與晴空視場類似的反演結果。因此對於雲遮視場而言，可依其雲參數的情形加以選用，增加資料同化時的資料來源。

關鍵詞：反演、資料同化

一、前 言

由於觀測儀器的改良和反演同化資料技術的改進，衛星資料對數值預報初始場分析的重要性日漸增加，較之於傳統資料而言，衛星資料具有水平解析度高，觀測函蓋面遼闊，大

量的資料來自於同一觀測儀短時間的測量，而使測量誤差易於掌控等優點。由過去的經驗得知，使用衛星觀測所提供的反演溫溼剖面，對數值預報的預報品質而言，在南半球及北半球傳統觀測資料稀少的地區，有正面的影響

(Bengtsson 1985; Kaskiwagi 1987)。但是由於衛星資料本身亦有其較難克服的問題，以及近十年來數值預報產品品質的提升，逐漸發現經由傳統方法反演得到的溫溼度剖面，在北半球地區不易發現有正面的貢獻 (Andersson *et al.* 1991; Kelly *et al.* 1991)

引起衛星反演溫、溼剖面不準確的因素有很多，就數學上而言，反演衛星資料是一個非適定的(ill posed)的問題，需要加入適當的約束條件才能求出適當合理的解，也因為這個緣故，反演衛星資料得到的溫溼剖面包函了使用約束條件時引入的初始猜測值(背景場)資料的誤差，因此當數值預報精確度提高後，衛星反演資料則顯得不夠精確了。Chedin *et al.* (1985)試圖以大量的大氣剖面資料庫作為選取初始場的參考，以減少初始場可能產生的誤差，但是仍無法完全避免此一問題。Smith *et al.*(1985)所提出的同時物理反演法，可同時求出地表(或雲頂)溫度和垂直溫溼剖面，而無須假設其中某項為已知，並具有計算快速(只需求取一個逆矩陣)，可以納入其它輔助觀測資料及對初始場猜測溫度不敏感等優點，劉與陳(1992)對此法運用於有雲視場之反演有較詳細的討論。近來被大量研究以變分學為基礎的反演法，和同時物理反演法一樣可以同時求出地表溫度、雲高、雲量、及溫度剖面等參數，並採用較精確的數值預報場當作初始場，更重要的是，它可以將適當的預報場誤差的協方差矩陣納入約束條件中，而使得當初始場的誤差特性合於誤差協方差矩陣時產生最佳化的解。

對於衛星反演或同化的問題，還有一個重要的議題，是衛星觀測和輻射模式誤差的估計與修正 Eyre (1992)。衛星觀測資料的誤差來

源除了觀測儀器本身的噪音引起外，衛星資料的前置處理也是引起誤差的一個因素，至於用來模擬衛星觀測的輻射模式，常常為求計算的時效而作某種程度的簡化，或因對某些大氣參數無法完全掌握等因素而產生微小的誤差，若不考慮這些誤差而直接使用衛星資料於反演或同化的過程中，會將錯誤的資訊污染到原本精確的初始場。變分學為基礎的方法，在求解過程中可將觀測誤差考慮在內，降低這項誤差的影響。

變分法在氣象上的應用可溯至 Sasaki (1958; 1970)，針對衛星資料的應用，Rodgers(1976)提供疊代法來處理反演上數值計算的問題，Eyre (1989)以模擬研究討論一維變分反演法運用於 TOVS 資料的可行性，並將這個方法用於 GALE (Genesis of Atlantic Lows Experiment) 實驗中進行真實資料的個案測試，結果顯示在傳統觀測資料密集的地區反演方法對溫溼剖面的改進有幫助，上層水汽場的改進尤其明顯，而反演出來的雲參數與 AVHRR 的影像比較，定性上而言也有合理的結果，Eyre *et al.*(1993) 結合一維變分法與最佳內插法同化 TOVS 輻射資料，証實衛星資料確能改進北半球地區的預報品質。將變分學法推廣至三維(四維)同化資料系統的研究中，Andersson *et al.* (1994)採取可抑制重力波產生之適當的風場質量場平衡條件限制下，同時分析質量、風場和水汽場，使得反演、分析與初始化的過程合而為一。在三維變分分析 TOVS 資料的研究中，所得的結果與先用一維變分再結合最佳內插的方法所得的結果一致，至於四維變分的運用，則是加入模式動力的資訊。Wu and Derber(1997)也使用三維的變分方法同化衛星的

輻射資料獲致不錯的結果。

變分學的方法目前已被大量使用，並推廣至三維、四維的資料同化系統中，而一維變分反演法仍具有實用上的價值，目前歐洲中心採用一維變分反演法作為品質檢訂的方法，Eyre(1993)指出只有在一維變分反演過程中收斂的衛星資料才被三維變分同化系統採用，另外一維變分可提供模式變數以外之其它變數的資料，如模式層頂以上地區的溫度資料。一維變分反演法也可用於測試新的衛星觀測，如Phalippoul(1996)以此法反演 SSM/I 資料得到水汽剖面、雲中液態水含量等大氣參數。

由於目前變分學法用於 TOVS 資料的研究大部分都以晴空的觀測為主，因此本文主要在討論使用高解析度 AVHRR 資料於一維變分法中，以探討有雲遮觀測時 TOVS 資料的應用潛力，第二節回顧理論與方法，第三節敘述資料來源與分析及本研究中以 AVHRR 為初始猜測雲參數時，所需之雲參數誤差估計及偏差修正，第四節是反演的結果，最後是討論與結論。

二、理論與方法回顧

導出變分學反演或同化資料所用的代價函數(cost function)的過程，是基於假設觀測資料與作為初始猜測之背景場資料的誤差是無偏且呈現高斯分布的形態，Lorenz (1986)描述利用貝氏定理(Bayesian estimation theory)導出代價函數的方法，曾(1988)亦簡述衛星反演方法中有關代價函數推導的過程。以下略述一般資料同化方法所採用的代價函數及其意義：

$$J(x) = (x - x^b)^T C^{-1} (x - x^b) + \{y^m - y(x)\}^T E^{-1} \{y^m - y(x)\} + G_o + G_c \quad (1)$$

上式所定義的代價函數可用於同化多種的觀測資料，亦可針對單一種觀測資料進行分析，其中 x^b 是數值預報的預報場當做初始估計（背景）場，矩陣 C 是背景場的誤差協方差矩陣(Error Covariance Matrix)， y^m 是衛星觀測各頻道的輻射值或亮度溫度， $y(x)$ 是代表由輻射計算模式模擬在大氣狀態 x 時的衛星觀測值， E 是衛星觀測與輻射計算模式兩者總和誤差的協方差矩陣，上標 T 代表矩陣的轉置，上標 -1 代表取此矩陣的逆矩陣， G_o 代表其它的觀測資料與背景場偏離的大小， G_c 可以是其它的約束條件，本實驗中我們省略 G_o 、 G_c 兩項，此時所定義的代價函數大小所代表的意義，即分析場 x 與背景場 x^b 之偏差與在 x 狀態下經輻射方程模擬之衛星觀測與真實衛星觀測的偏差兩者的總合。因此當代價函數定義後；接下來就是要求出一個分析場 x 使得代價函數降至極小值，亦即求出一個分析場 x ，而使分析場不偏離背景場太遠，也合於觀測資料。就數學上而言，即尋找一個分析場 x 使得代價函數的微分量為零，如(2)式，

$$J'(x) = C^{-1} (x - x^b) - k(x)^T E^{-1} \{y^m - y(x)\} = 0 \quad (2)$$

其中 $k(x)$ 是 $y(x)$ 對 x 的微分。

就數值上而言，尋找代價函數極值的方式可採用不同的方法，利用伴隨理倫(adjoint method)是目前被廣泛使用來求取代價函數極值的方法，其基本精神是利用觀測前推模式(Forward model)之切線方程的伴隨算子，導出代價函數的梯

度，再採取適當的下降算法，降低代價函數值(曾，1997)。

由於在實際反演衛星觀測的狀況下，即使是晴空視場，問題只是趨近於線性而非真實的線性，而在有雲的情形下則問題的非線性特質將會增強，此時數值上求解(2)式的公式必需是一疊代公式 Rodgers (1976)。如公式(3)：

$$x_{n+1} = x_n - J''(x_n)^{-1} J'(x_n) \quad (3)$$

$$J''(x)^{-1} = S_n = (C^{-1} + k_n^T E^{-1} k_n)^{-1} \quad (4)$$

當 x_n 為猜測值時可求出疊代解 x_{n+1} ，第一次疊代計算時 $x_n = x_b$ ， $k_n = k(x_n)$ ， S_n 可代表反演(分析)的誤差協方差矩陣，當觀測頻道的個數小於反演變數的個數時， S_n 有比較有效的計算公式如下：

$$S_n = C - Ck_n^T (k_n Ck_n^T + E)^{-1} k_n C \quad (5)$$

利用公式(3)疊代求解直到 $x_{n+1} - x_n$ 小於某一可接受的範圍為止，這次實驗此定值的選訂，如 Eyre(1989)之模擬研究，是以矩陣 C 中的對角線元素乘上 0.4 而得，亦即以背景場誤差標準方差的 0.4 倍做為收斂的判斷。公式(3)經由矩陣的運算可以得到另一比較便利的計算公式：

$$x_{n+1} = x^b + W_n \{y^m - y(x_n) - k_n(x^b - x_n)\} \quad (6)$$

$$W_n = Ck_n^T (k_n Ck_n^T + E)^{-1} \quad (7)$$

當疊代計算收斂後，將反演得到的 x_{n+1} 代入輻射計算模式中，檢查 $y^m - y(x_{n+1})$ 的值，是否在每個頻道都落於觀測頻道誤差的數量級中，如果是則判定所作的反演結果是合理的，如果大於觀測誤差的數量級時則視為不好的反演。這個檢查的特性提供了一個極其自然

且有效的條件作為品質檢定的方法，此次實驗檢查的標準是 $y^m - y(x_{n+1})$ 需小於該頻道誤差的 4 倍。

由於目前是處理一維的情形，因此還需要後續的同化工作將目前所得到的垂直剖面放到三維的分析場中，而要將目前的方法所得到的一維資料放到後續的同化工作時，一定會碰到背景場相依的問題，因此必需依其由衛星觀測中取出的資訊多寡決定其權重的大小，公式(4)所計算的反演誤差協方差矩陣 S_n 與背景場誤差協方差矩陣 C 的對角線元素比值 S_{ii} / C_{ii} 提供一個理論值作為反演變數權重依據，當 S_{ii} / C_{ii} 接近於一時，則反演的剖面與背景場相近，所給的權重降低，而其值接近於零時反演剖面由衛星觀測取出的資訊多，將增加其權重。有關背景場相依的問題 Eyre(1993)提出處理此一問題的方法。

最後是數值解的穩定度問題，一般而言在晴空的情形下發生不穩定的機率不大，但當有雲存在時，問題的非線性特質增加，會造成解的震盪而不收斂。Eyre et al.(1989)所述的阻尼(damping)公式可解決此一問題，但也會造成反演品質的下降。這次實驗中採用 AVHRR 的資料求出較精確的雲參數、目的也是希望能夠降低有雲存在時非線性的特性。

三、資料來源與分析方法

此次實驗選取 1996 年 7、8 及 9 月份的資料，衛星資料包括 NOAA-12 號衛星上的 TOVS 與 AVHRR 兩種資料，其中 TOVS 資料包括紅外線觀測儀 HIRS、微波觀測儀 MSU 及觀測平流層大氣溫度剖面的紅外線觀測儀

SSU。由中央氣象局衛星中心提供。溫度與水汽的預報及分析場是中央氣象局資訊中心所提供的有區域模式之存檔資料。7、8 月份的資料是用於計算背景場與觀測誤差之協方差矩陣，9 月份的資料用來進行反演的測試。

首先就分析 TOVS 頻道誤差特性的方法

加以說明，此次分析誤差特性的方法是源自於歐洲中心 Eyre(1992)所採用的方法，其方法大致的流程如下：首先是資料的收集，收集在 12 小時預報場時間 3 小時內的衛星觀測資料，與由 12 小時預報場為輸入經輻射模式所模擬的衛星觀測資料，並紀錄每一個衛星觀測資料的掃描角度與雲晴判別。接著是品質檢定的過程，

表一 各頻道誤差特性，單位是亮度溫度(k)

Channel	bias			Standard deviation		
	July	August	September	July	August	September
HIRS 2	3.091	3.050	2.985	1.097	1.458	1.244
HIRS 3	1.528	1.553	1.492	0.820	1.129	0.978
HIRS 4	1.466	1.621	1.688	0.398	0.587	0.454
HIRS 5	1.360	1.620	1.773	0.456	0.556	0.419
HIRS 6	0.334	0.676	0.928	0.668	0.691	0.548
HIRS 7	-0.904	-0.560	-0.175	1.032	1.040	0.998
HIRS 8	-4.688	-4.734	-4.404	1.526	1.403	1.690
HIRS 10	-2.401	-2.250	-1.857	1.107	1.103	1.304
HIRS 11	1.515	2.814	4.205	2.712	3.012	2.591
HIRS 12	8.335	9.933	10.680	3.268	4.062	3.407
HIRS 13	-1.001	-1.001	-0.842	0.570	0.471	0.509
HIRS 14	-0.531	-0.526	-0.369	0.635	0.398	0.351
HIRS 15	-0.463	-0.508	-0.470	0.347	0.369	0.283
HIRS 16	-0.090	-0.103	0.119	1.116	1.122	0.883
MSU 2	-0.426	-0.333	-0.425	0.628	0.661	0.619
MSU 3	-1.011	-1.081	-1.336	0.513	0.546	0.583
MSU 4	0.598	0.203	-0.330	0.923	0.901	0.914

先檢查 MSU 的 2、3 及 4 頻道的亮度溫度，若亮度溫度不在 150°K 到 350°K 之間，且衛星觀測與模擬之差值不在 -20°K 至 20°K 之間者，則將其剔除，接著是檢查窗區頻道，若觀測與模擬之差值不在 -4°K 到 8°K 的範圍內，則視為品質不佳的資料，最後是計算每個頻道觀測與模擬之差值的平均與標準方差，若其中有任何一個頻道的差值減去該頻道的平均之值大於方差的三倍，則視為不好的資料。經上述方法所選取的資料再進行掃描角度的修正。由於掃描角度的不同，大氣光程理論上會有所改變，假設光程愈長可能引起的誤差愈大，因此其修正的方法是比較角度為零與其它角度的誤差大小，期能找到因角度所引起的誤差，但由實驗的結果來看，角度引起的誤差效果不顯著，因此在此沒有作角度修正的必要。最後是隨大氣特性不同而引起的誤差的修正，這個方法是收集大量的衛星觀測資料，求得誤差修正的矩陣。但本次實驗中歐洲中心使用的方法似乎沒有產生良好的效果，可能的原因是歐洲中心所處理的是全球的資料，因此所分析的資料量比較龐大，所求得用以修正此項誤差的係數比較具代表性，但目前我們尚未仔細探討此一問題，此次實驗所使用之觀測頻道，誤差分析的結果列於表一，由表一可以發現 7、8 及 9 月份誤差的特性十分類似，因此我們在以 9 月份衛星資料進行反演實驗時，是將衛星觀測直接減去 8 月份所求得的偏差來作修正，修正的頻道包括 HIRS 2、3、4 及 5 頻道，至於 HIRS 12 頻道的偏差似乎太大，在實驗中需降低其對反演的影響。

為了使用 AVHRR 資料分析 HIRS 視場中的雲參數，實驗中採用 Aoki (1990)的方法，找

出落在 HIRS 視場中的 AVHRR 觀測點，圖 1 是 HIRS 頻道 8 與落在 HIRS 視場中 AVHRR 頻道 4 平均亮度溫度的散落圖，由於 HIRS 頻道 8 與 AVHRR 頻道 4 的光學特性十分接近，因此若 AVHRR 確實落在 HIRS 視場中，則散落圖中各點應集中於對角線上，由圖 1 中可以看到各點的分布大多在對角線上，可見 Aoki(1990)所用的方法十分可靠。由於一個 HIRS 視場中可以包函 300 至 600 個 AVHRR 觀測，因此可以採用一些適當的統計方法，將 HIRS 視場分類為均勻視場，單層雲、多層雲等不同的類別，在此次實驗中採用 Taylor (1985)所提出的方法，圖 2 是以此方法所得的單一 HIRS 視場中 AVHRR 資料的加權直方圖，及該 HIRS 視場中 AVHRR 所顯示的雲布分影像，由於這個 HIRS 視場是部分雲遮的情形，可以使用下列的公式計算出雲分量。

$$N = \frac{I_{\text{clr}} - I_{\text{mean}}}{I_{\text{clr}} - I_{\text{cloud}}} \quad (8)$$

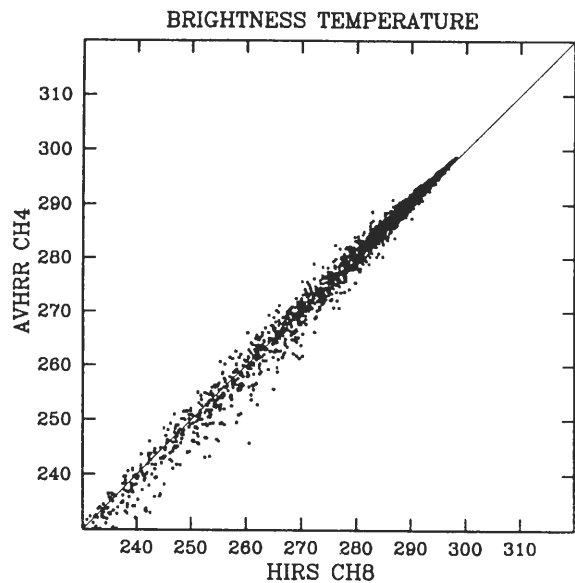


圖 1 HIRS 頻道 8 的亮度溫度及其相對應的 AVHRR 頻道 4 的平均亮度溫度。

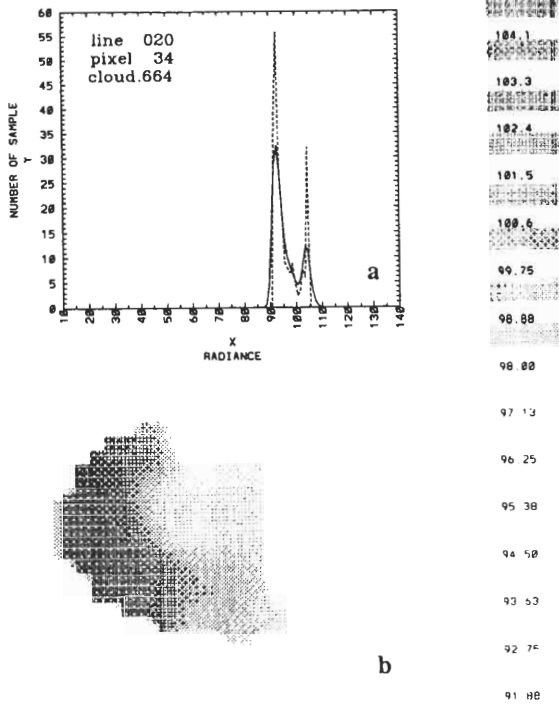


圖 2 (a)單一 HIRS 視場中 AVHRR 觀測的原始直方圖(虛線)，與經 Taylor(1985)法所得的加權直方圖(實線)，(b)此 HIRS 視場內的 AVHRR 之雲分布圖。

其中 N 為雲分量 I_{clr} 是晴空輻射值， I_{cloud} 是雲遮輻射值， I_{mean} 是平均輻射值。本次實驗除了將 HIRS 視場的均勻性加以判別外，並以 Saunders (1988) 的方法，判斷 AVHRR 各點的雲晴狀況，因此實驗中可將 HIRS 視場分為晴空，部分雲遮，全雲及多層雲等不同的情形，估算雲量的方法如公式(8)所示，估算雲高的方法，則是計算各均勻層的亮度溫度，然後比對預報場的溫度剖面而得。

由於以 AVHRR 估算的雲參數與使用 HIRS 頻道經一維變分法反演之雲參數，可因為方法與儀器的相異而產生某種程度上的誤差，因此在本研究中以 8 月份的資料反演部分雲遮視場的雲參數，以求得以 AVHRR 所求取的雲

參數與以一維變分法所求取之雲參數間的關係式，此次計算中一維變分背景誤差矩陣的雲高誤差設定為 50mb，雲量誤差設定為 0.1。其結果如圖 3 所示，其統計迴歸關係式如下：

$$N_f = 0.235 + 0.723N_A - 4.803 \times 10^{-5}T_A \quad (9.1)$$

$$T_f = -54.07 + 33.175N_A + 1.00829T_A \quad (9.2)$$

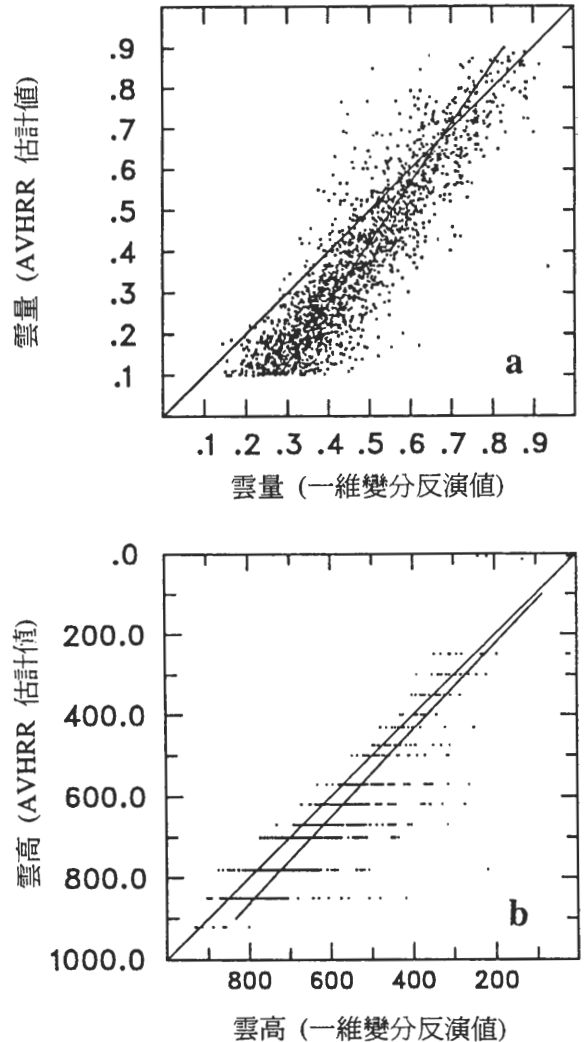


圖 3 (a)雲量，(b)雲高(hPa)，AVHRR 估計值為縱座標，一維變分反演值為橫座標，所得的散落圖。8 月分之資料共 2240 個觀測。雲量二者偏差 0.0982，標準方差 0.0935，雲高二者偏差-53.47，標準方差 57.56。

其中 N 代表雲量、 T 代表雲高所在的氣壓值 (hPa)、下標 f 代表由統計迴歸計算的結果， A 代表以 AVHRR 估算之結果。在以後的計算中，以此統計方法求得的雲參數作為一維變分反演的初始猜值。最後是估計此迴歸統計雲參數與反演雲參數的誤差，作為一維變分中背景誤差矩陣中設定值的參考，其結果如圖 4 所示，偏差的部分可被修正，所剩的隨機誤差，

其雲高誤差標準差是 57.37，雲量的誤差標準差為 0.071。因此我們在以後的實驗中，部分雲遮的情形，雲高誤差設定為 70hPa，而雲量設定為 0.1，而在全雲遮的情形雲高誤差設定為 50hPa，而雲量設定為 0.1。

最後是預報場誤差分析的方法，收集 7 月到 8 月的預報場與分析場，資料選取的空間範圍在北緯 2 度到 47 度，東經 94 度到 150 度之間，約為 NOAA 衛星在台灣接收的資料之掃描範圍，以預報場與分析場的差值，當作預報場的誤差，分析結果各層的誤差大小如表二。

四、實驗結果

(一) AVHRR 資料對計算收斂的影響

Eyre(1989)指出精確的初始雲參數可增加反演成功的機率，並可降低疊代計算的次數，因此我們利用這個特性來觀察 AVHRR 所求得雲參數的誤差特性，及其對一維變分法計算上的助益。以 9 月 3 日的個案加以討論，部分雲遮的觀測共 272 個，全雲遮的情形共 1733 個，第一個實驗是將以 AVHRR 估出的雲參數中的雲高部分，分別向上、向下調偏原有的估計值作為一維變分反演的初始猜測，統計其收斂的成功率與疊代次數，實驗結果如圖 5 所示，圖中實線代表全雲遮的視場統計結果，虛線代表部分雲遮的統計結果，圖 5a 代表收斂的百分比，圖 5b 代表疊代計算的次數，由圖中顯示大致而言當始雲高偏離 AVHRR 所估計時，反演的成功率下降，而所須疊代的次數增加。第二個實驗是改變初始雲量的測試，結果如圖 6 所示，實線所代表的是全雲遮的情形，虛線代表部分雲遮的情形，由圖中所示在全雲遮的情

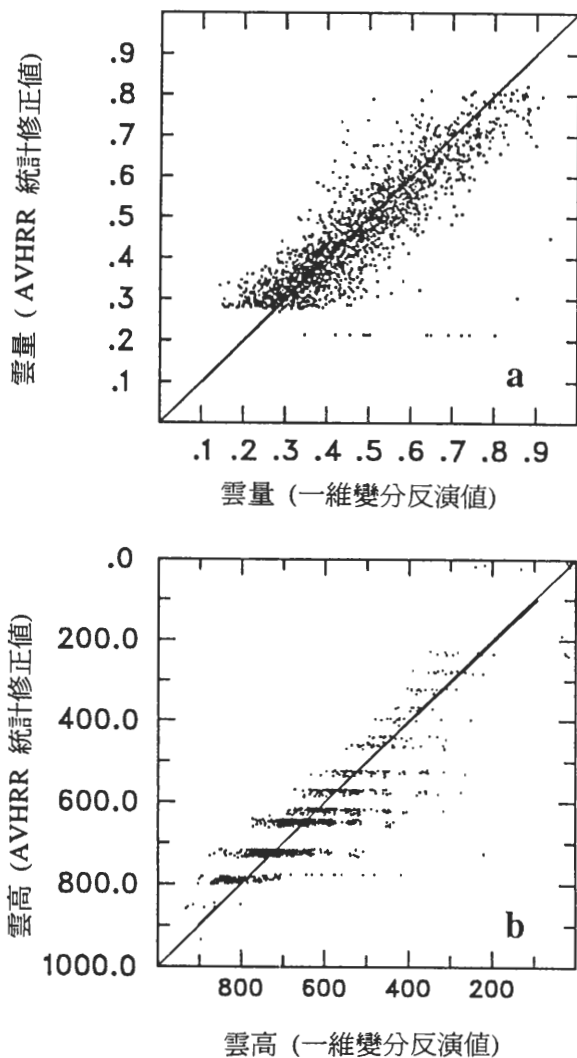


圖 4 如圖 3，(a)雲量，(b)雲高(hPa)。惟一的不同 AVHRR 估計值經文中統計公式修正。雲量，雲高的偏差可被訂正。

表二 垂直誤差各層的大小(誤差標準差)

氣壓(hPa)	參數種類	誤差標準差
100	溫度	0.899° K
150	溫度	1.061° K
200	溫度	1.005° K
250	溫度	0.819° K
300	溫度	0.732° K
400	溫度	0.664° K
500	溫度	0.663° K
700	溫度	0.730° K
850	溫度	1.006° K
1000	溫度	1.452° K
300	水汽(對數)	0.121g/kg
400	水汽(對數)	0.095g/kg
500	水汽(對數)	0.086g/kg
700	水汽(對數)	0.058g/kg
850	水汽(對數)	0.054g/kg
1000	水汽(對數)	0.047g/kg

形下，仍是以 AVHRR 所估得的雲參數為初始猜測的結果最佳，而部分雲遮情形時當雲量加大 0.3 附近時，似乎疊代的次數最低，顯示以 AVHRR 估算的雲量似乎有低估的現象，這個現象在 8 月份的統計資料中也可觀察的到。如圖 3 所示。因此由 8 月份的統計特性與上述兩個實驗可知 AVHRR 所估算的雲參數可降低疊代計算的次數與增加其成功收斂的次數，並且顯示

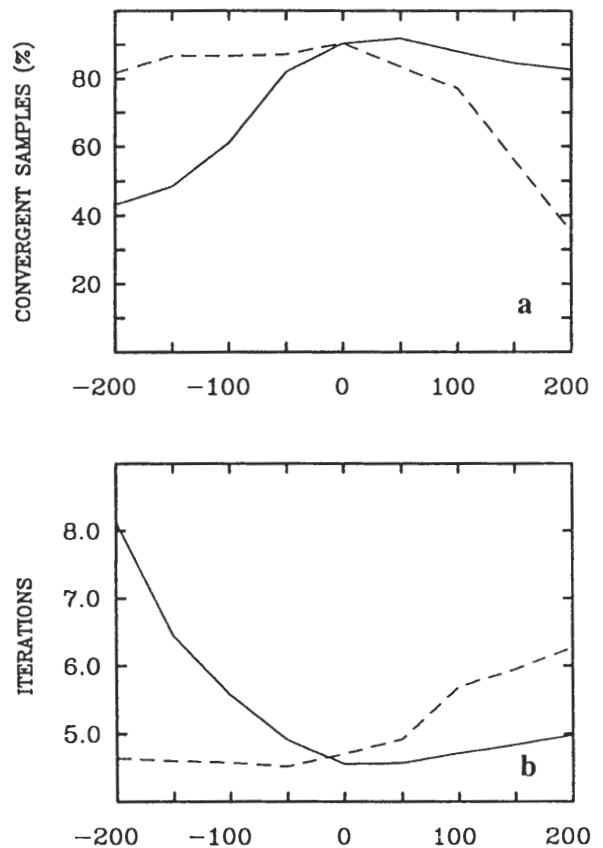


圖 5 (a)成功收斂率與初始雲高偏離 AVHRR 估計值的關係，縱座標為成功收斂率，橫座標是偏離的大小，單位是 hPa。(b)計算疊代次數與初始雲高偏離 AVHRR 估計值的關係，縱標是疊代次數，橫座標是偏離的大小。實線代表全雲遮的情形，虛線代表部分雲遮的情形。

AVHRR 估算的雲量參數有低估的現象，因此在使用 AVHRR 資料估計一維變分初始猜測值時，公式(9)的統計修正是必需的。

(二) AVHRR 資料對反演結果的影響

選取 9 月 3 日至 9 月 21 日 NOAA-12 的衛星觀測資料，進行反演的實驗，資料來源是中央氣象局的存檔資料，可用的資料共有 15 次的掃描觀測。以分析場為參考的真值，但只選取反演成功個案中 200km 內有探空者加以統

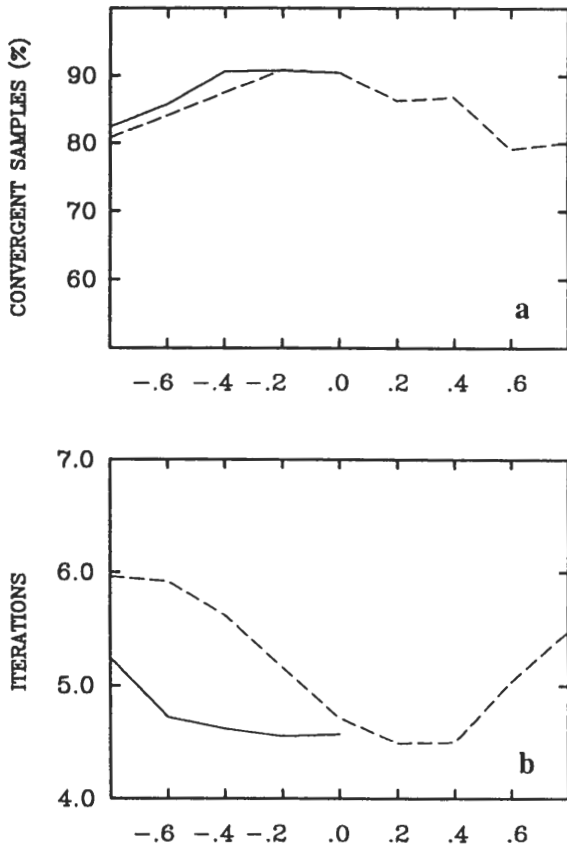


圖 6 如圖 5，惟一的不同是此次作雲量的調整，橫座標是雲量偏差量，縱座標如圖 5。

計。以中央氣象局有限區域模式 12 小時的預報場作為溫溼剖面的初始猜值。

以下三個實驗主要討論經統計修正 AVHRR 所估計之雲參數初始猜值與雲參數背景誤差設定對反演結果(溫、溼剖面及雲參數)的影響，實驗一是將經統計修正 AVHRR 所估計的雲高值加上 200 hPa，即調差雲參數的初始估計值，並設定雲高背景誤差 300 hPa，雲量背景設差 0.5，在此設定下反演雲參數，可調的空間加大，亦即初始雲參數估計對反演雲參數的束縛強度減弱，反演的結果顯示，2571 個反演

個案中有 74.7%反演成功，疊代計算的次數 5.40 次，反演的雲參數與經統計修正 AVHRR 所估計值的比較如圖 7 所示，由圖中顯示反演的雲參數與 AVHRR 估計值相差甚遠，而溫溼剖面的反演結果如圖 8 所示，圖中實線代表背景場誤差虛線代表反演誤差。實驗二如實驗一，惟

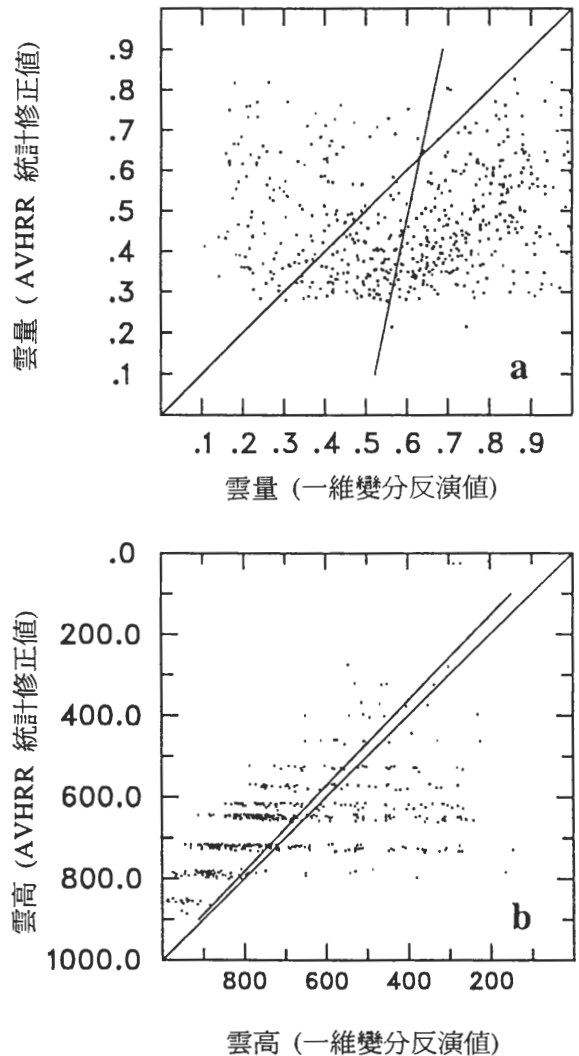


圖 7 (a)雲量，(b)雲高(hPa)，AVHRR 統計修正值為縱座標，反演值為橫座標，所得的散落圖。雲參數初始值：雲量為 AVHRR 統計修正值，雲高為 AVHRR 統計修正值加 200hPa；背景雲參數誤差：雲量 0.5，雲高 300hPa。

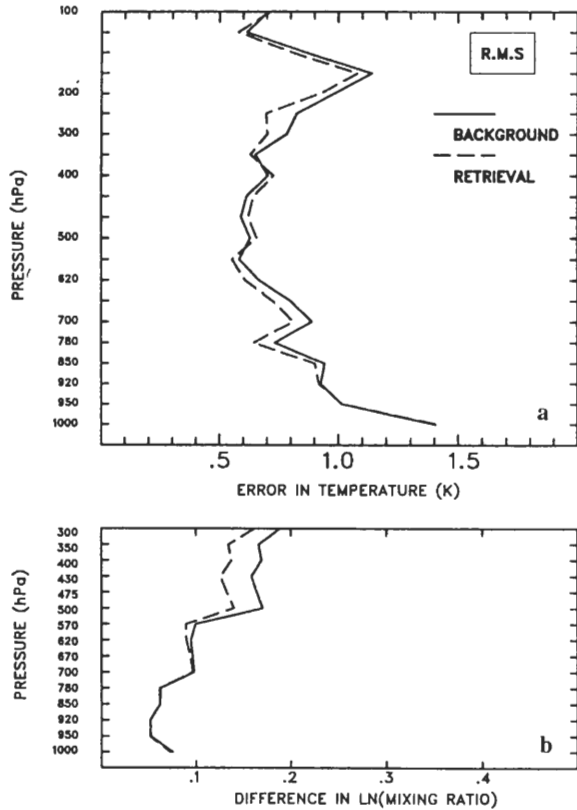


圖 8 (a)溫度, (b)水汽, 實線代表 12 小時預報場(背景場)的誤差均方根, 虛線代表反演的誤差均方根。

一的不同是將雲高背景誤差設為 70hPa, 雲量背景誤差設為 0.1, 亦即使反演雲參數可調的空間變小, 反演結果顯示, 80%成功收斂, 反演疊代次數 5.65, 反演的雲參數如圖 9 所示, 由圖中可以看出當限制增強後, 反演雲參數接近初始猜測值, 即使雲參數的初始估計並不準確。但是觀察其反演溫溼剖面則發現, 反演的結果品質較實驗一下降甚多如圖 10 所示。第三個實驗是如實驗二, 但是雲參數的估計恢復為經統計修正 AVHRR 所估計者, 實際結果顯示反演成功率提高為 87.9%, 疊代計算次數降至 4.81, 反演的雲參數接近經統計修正 AVHRR 所估計者,

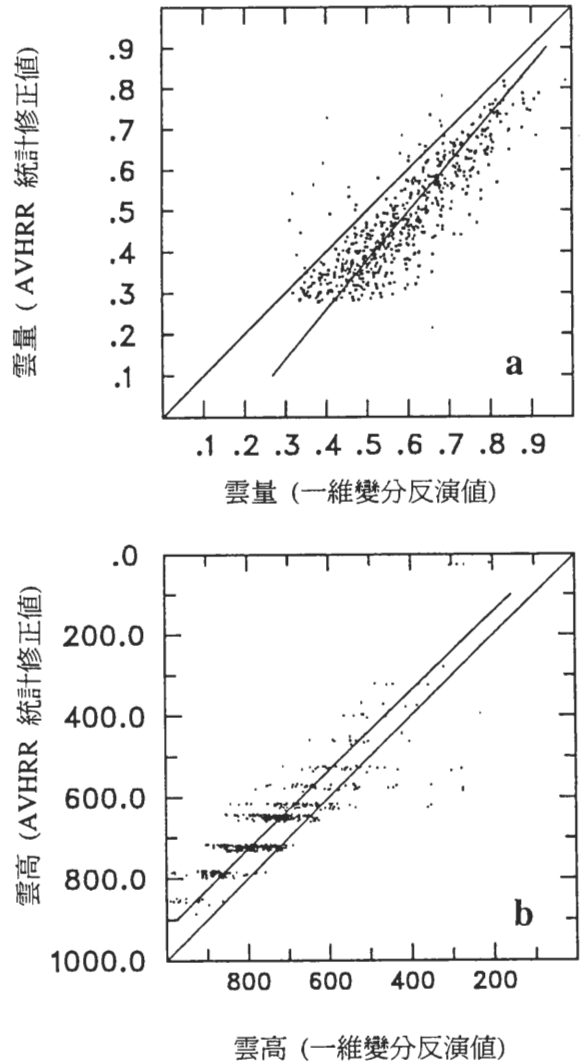


圖 9 如圖 7, (a)雲量, (b)雲高(hPa), 惟背景雲參數誤差設定變更爲: 雲量 0.1, 雲高 70hPa。

如圖 11 所示, 反演的溫溼剖面的結果顯示可以改進預報場的誤差, 如圖 12 所示。以上三個實驗的設定與反演結果可參考表三所列。由以上三個實驗可得出下列的結論, AVHRR 資料確可提供較為準確的雲參數初始猜測值, 而精確的初始雲參數值, 除如上節所述, 可提高反演成功的機率; 降低疊代計算的次數外, 並且只有在良好

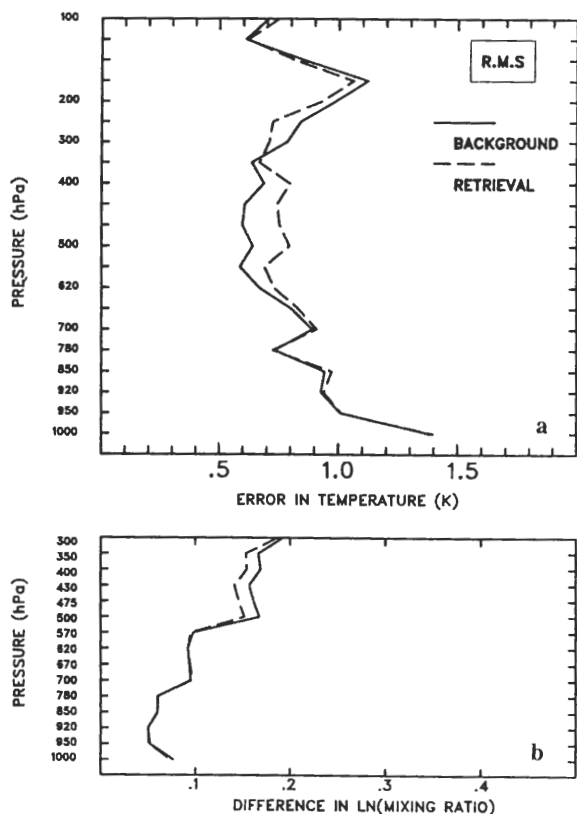


圖 10 (a)溫度, (b)水汽, 實線代表 12 小時預報場(背景場)的誤差均方根, 虛線代表反演的誤差均方根。

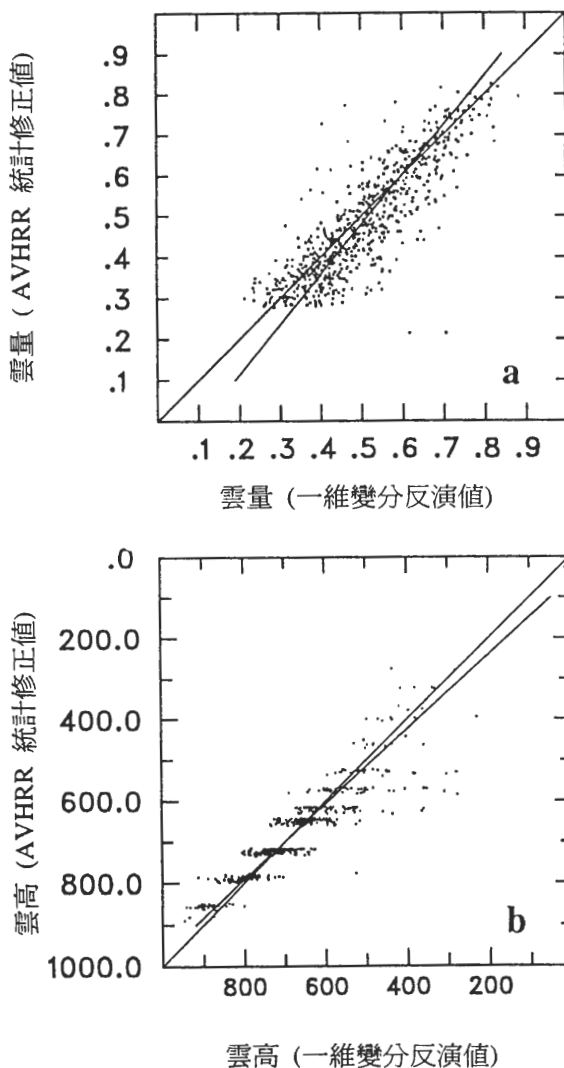


圖 11 如圖 9, (a)雲量, (b)雲高(hPa), 惟初始雲參數估計恢復為 AVHRR 統計修正值。

的雲參數估計下, 才可同時提供良好的反演雲參數與溫溼剖面。由於使用 AVHRR 資料可以求得較準確的雲參數, 因此下節以雲參數不同的情形加以分類討論其反演溫溼剖面的品質。

(三) 溫溼剖面的反演

首先討論晴空的個案, 以作為與有雲情況時的比較參考, 圖 13 是反演誤差的均方根, 圖中實線代表 12 小時預報場誤差, 亦即反演初始猜測值的誤差, 虛線是反演後的誤差。由圖中可以發現溫度場有些微的改進, 可減少均方根誤差 0.2K, 水汽場則在高層有較明顯的改進, 可改進水汽(g/Kg)的對數值約 0.06, 此結果

與 Eyre(1989)所得的結論類似, 雖然對於溫度剖面而言, 改進的程度不大, 但是事實上 12 小時的溫度預報場本身的精確度已經十分的高, 其均方根誤差在 0.5 到 1.0 附近, 而衛星資料在變分學方法中可作適的偏差修正與隨機誤差的估計, 仍能將衛星資料的資訊取出對溫度剖面之修正有正面的貢獻。

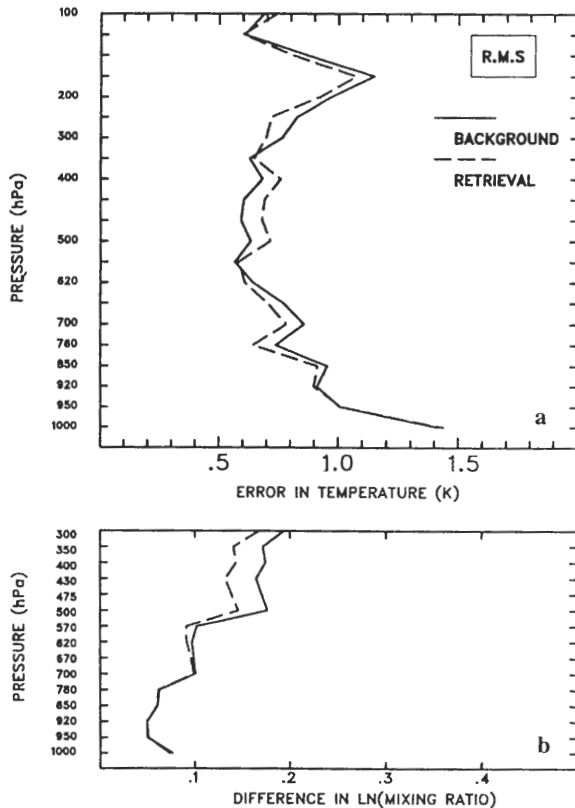


圖 12 (a)溫度，(b)水汽，實線代表 12 小時預報場(背景場)的誤差均方根，虛線代表反演的誤差均方根。

接下來是討論全雲的個案，反演成功合於選取條件的個案共 5437 個，以反演雲高作為分類的條件，雲高落在 1000hPa 到 900hPa 之間的個案共 1717 個，其溫溼剖面的誤差均方根如圖 14 所示，與晴空的特徵十分的類似，大體上而言溫度在 500hPa 以下到 850hPa 之間有較大幅度的修正，水汽在高層修正較多，這樣的結果應是合理的，因為低層的雲只會遮蔽下層，理論上是不會影響到較高層的分演結果。圖 15 是反演雲高在 900hPa 到 800hPa 之間的 2116 個個案的誤差均方根，由圖中可以看到溫度剖面的修正在 780hPa 以下幾乎不存在，而水汽的修正量也驟減，探究其原因，是因為用以反演水汽的 HIRS 10、11 及 12 頻道是紅外線的觀測儀器，會受到雲遮的影響，而此次實驗中由於 12 頻道的觀測誤差頗大，我們已調降其對反演的影響，故真正有效作用的頻道只有 10 和 11 頻道，而第 10 頻道的權重函數極值在低層，11 頻

表三 不同雲參數初始猜值及背景誤差設定的反演計算結果

參數設定	實驗一	實驗二	實驗三
雲高初始猜值	統計修正 AVHRR 估計值+200hPa	統計修正 AVHRR 估計值+200hPa	統計修正 AVHRR 估計值
雲量初始猜值	統計修正 AVHRR 估計值	統計修正 AVHRR 估計值	統計修正 AVHRR 估計值
雲高背景誤差設定	300hPa	70hPa	70hPa
雲量背景誤差設定	0.5	0.1	0.1
反演結果	實驗一	實驗二	實驗三
收斂成功率	74.7%	80%	87.9%
疊代次數	5.40	5.65	4.81

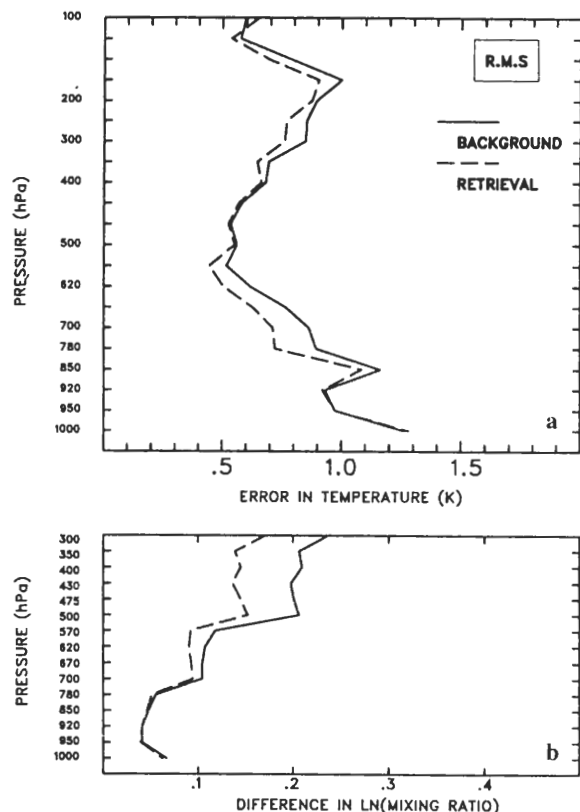


圖 13 507 個晴空反演個案的誤差均方根，圖(a)為溫度、圖(b)為水汽。實線代表背景場(12 小時預報場)誤差，虛線代表反演的誤差。

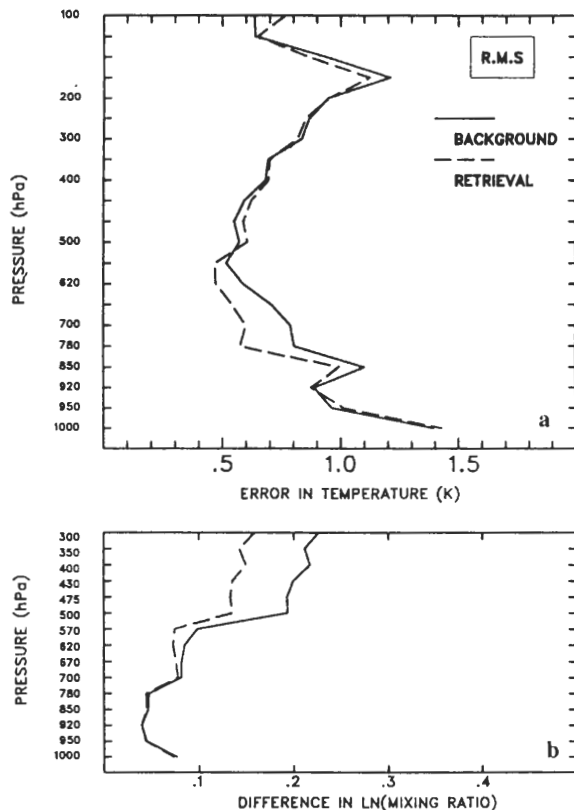


圖 14 全雲遮視場，雲高在 1000hPa 至 900hPa 之間，共 1717 個個案的反演均方根誤差，圖(a)為溫度、圖(b)為水汽，實線是背景場誤差，虛線是反演誤差。

道的權重函數極值在 700hPa 附近，故當雲預高在 900 至 800hPa 之間時，水汽的反演效果有限。圖 16 是反演雲高在 800hPa 到 700hPa 時的反演誤差均方根，共 633 個個案，由圖中可以看出水汽的反演效果完全失敗，而溫度的修正量則變得更加微小。雲高在 700 到 600hPa 及其它更高層雲的地區的反演的結果也是與圖 16 所示類似，雖然溫度的改進太小也許不能代表足夠的意義證明有改進的效果，但是就理論而言在全雲遮時 MSU 的微波頻道仍可對溫度剖面進行修正。

最後討論部分雲遮的反演情形，總共選取 684 個個案，圖 17 是反演雲高在 1000hPa 到 900hPa 之間的 15 個個案，由圖中可以看出水汽與溫度的反演都有良好的結果。圖 18 是反演雲高在 900hPa 到 800hPa 的 75 個個案的誤差均方根。圖中也顯示有不錯的反演結果，尤其是相較於全雲遮雲頂相同的反演情形(圖 15)可以看到水汽仍有較明顯的改進。圖 19 是反演雲高在 800hPa 到 700hPa 之間的 234 個個案的平均結果，由圖形中可以看到水汽在上層仍有不少的改進，溫度的修正則較為不明顯。當雲高更高時水汽的修改幾乎沒有，而溫度的修正也不明

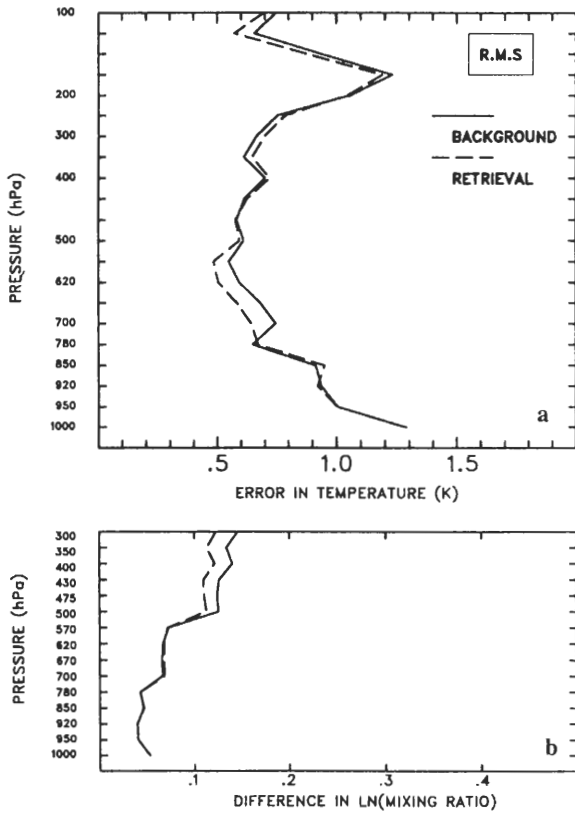


圖 15 全雲遮視場，雲高在 900hPa 到 800hPa 之間的 2116 個個案的反演均方根誤差，圖(a)為溫度，圖(b)為水汽，實線是背景場誤差，虛線是反演誤差。

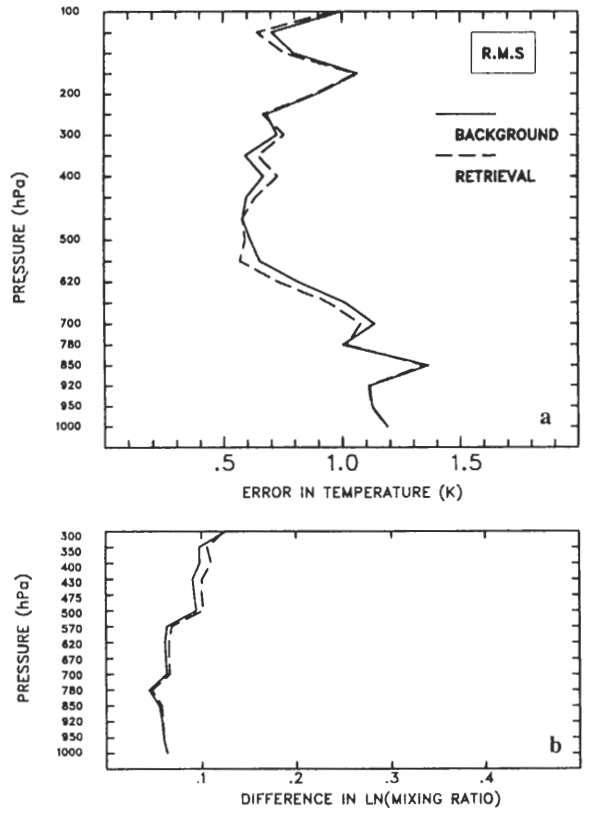


圖 16 全雲遮視場，雲高在 800hPa 到 700hPa 之間，633 個個案的反演均方根誤差，圖(a)為溫度，圖(b)為水汽，實線是背景場誤差，虛線是反演誤差。

顯，因此由此次的實驗顯示對部分雲遮的情形而言，仍以低層雲時的反演個案比較能得到良好的結果，而對於這個現象產生的原因，可能是因為在部分雲遮的情形時雖然輻射仍可來自雲層的下方，但無論如何其所估的能量仍是所有觀測能量中的少部分，因此對反演而言對下層的資訊仍是較薄弱的。圖 20 是雲高在 800hPa 到 600hPa 且雲量少於 0.35 的 59 個個案的平均誤差，由圖中可以觀察到，當雲量較小時反演的溫溼剖面在雲高較高時仍有不錯的品質。

五、結 論

以變分學為基礎的反演或同化資料的方法，近年來被大量的採用與研究。尤其是對於衛星資料而言，過去認為其垂直解析度不夠精確，而在數值模式作客觀分析或資料同化時常被視為不佳的資料，只有在南半球或傳統觀測稀少的洋面上才被採用，也因變分學法的發展而被重新評估與重視。由於變分反演法需要對觀測資料與背景場資料的誤差特性有所了解才能提高其效果。因此本次實驗我們以 1996 年

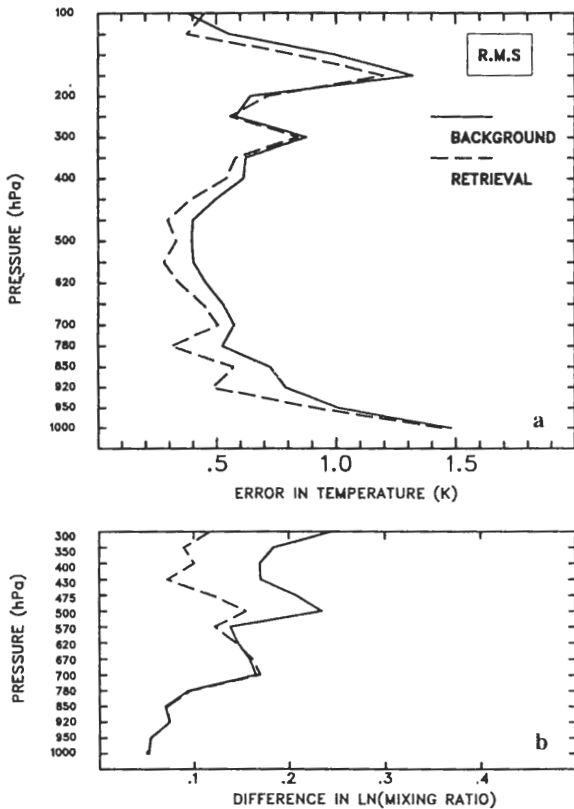


圖 17 半雲遮視場，雲高在 1000hPa 到 900hPa 之間，17 個個案的反演的均方根誤差，圖(a)為溫度，圖(b)為水汽，實線代表背景場誤差，虛線代表反演的誤差。

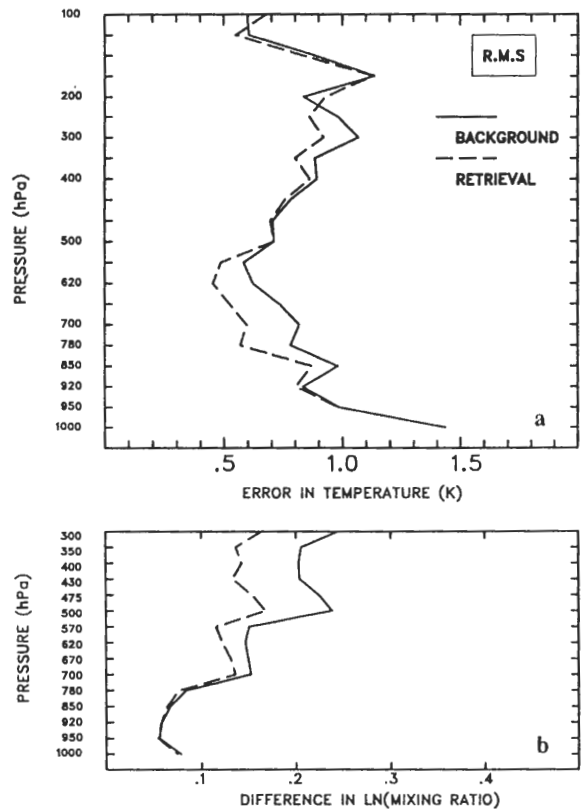


圖 18 半雲遮視場，雲高在 900hPa 到 800hPa 之間，75 個個案的反演均方根誤差，圖(a)代表溫度，圖(b)代表水汽，實線代表背景場誤差，虛線代表反演誤差。

7、8 兩個月份的 HIRS 觀測頻道資料進行誤差統計與偏差修正的工作，並計算被當成背景場的中央氣象局有限區域模式 12 小時預報場的垂直誤差協方差矩陣，另外為了對 HIRS 視場雲晴狀況的判別，我們首度結合了 AVHRR 資料於一維變分反演法中，建立一個完整的反演工具，並測試其反演的結果。

首先討論結合 AVHRR 資料對變分反演雲參數的影響，由實驗的結果顯示 AVHRR 對反演雲參數而言是必要的，由於若不使用 AVHRR 資料事先求得一個較佳的雲參數，則在

反演的過程必須放寬對求雲參數的限制，而此時變分反演法只能得到一個等效的雲參數(使計算的輻射值與觀測值接近)而與真實的雲的狀況相差很遠。然若只單獨使用 AVHRR 的資料則在理論上尚須修正大氣的干擾效果，不如變分學法的理論完備。

至於 AVHRR 資料對反演溫溼剖面的影響，實驗的結果顯示，一維變分反演法於反演有雲觀測時，即使在初始雲參數猜值不佳的情形下，可因放寬對雲參數反演的限制(將背景誤差協方差矩陣中的雲參數誤差值調大)而降低因雲存在而對反演溫、溼剖面的干擾，因此就已

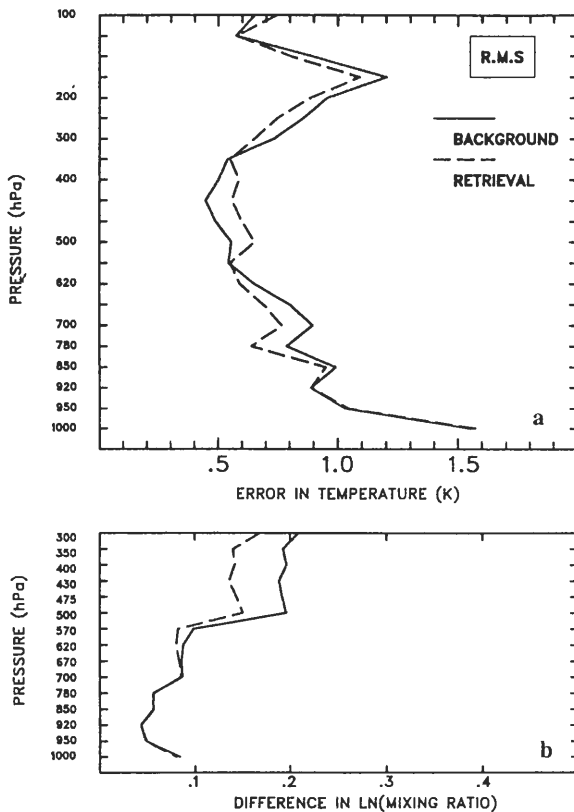


圖 19 半雲遮視場，雲高在 800hPa 到 700hPa 之間，234 個個案的反演均方根誤差，圖(a)為溫度，(b)為水汽，實線代表背景場誤差，虛線代表反演誤差。

反演收斂成功的溫、溼剖面而言，其品質的好壞與使用較佳初始雲參數者並無十分明顯差異，但在這種情形下，除了雲參數的反演品質不佳，一維變分疊代計算的次數增加，且收斂成功的機率變小。而當使用 AVHRR 資料提供較精確的初始雲參數猜值時，可增加對反演雲參數的束縛，此時除了計算上疊代次數降低外，反演成功的機率也增加，同時雲參數的反演結果也較正確，而對反演溫、溼剖面而言，也可降低其受有雲存在的干擾。因此 AVHRR 資料對於一維變分反演法的溫、溼剖面影響而言，就數值計算上可增加計算的速度，就資料

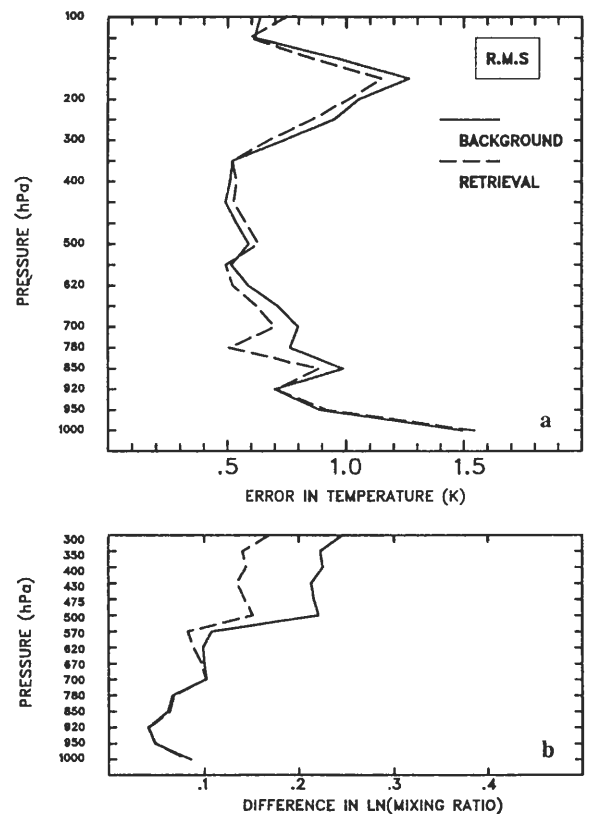


圖 20 半雲遮視場，雲量在 800hPa 到 600hPa 之間，雲量小於 0.35 的 59 個個案的反演均方根誤差，圖(a)為溫度，圖(b)為水汽，實線代表背景場誤差，虛線代表反演誤差。

分析上，增加收斂成功率，即為增加更多的溫、溼反演剖面資料，並且只有在 AVHRR 提供精確的初始雲參數猜值時，一維變分演法才能同時反演得到合理的雲參數及大氣溫、溼剖面。因此 AVHRR 對於反演溫、溼剖面的助益在於，一方面提供數量較多的溫、溼剖面資料，另一方面由於雲參數精確度的提高，可依雲參數的不同而加以分類，找出判斷何種雲參數狀態下反演溫、溼剖面的品質較佳，作為使用有雲觀測資料的參考。

有雲視場反演的結果，如前所述因雲參數的分析較為精確，因此可以用不同雲高雲量

等情形加以分類，由實驗的結果可知全雲遮的情形下，雲高在 1000hPa 到 900hPa 之間時反演的溫溼剖面與晴空時效果類似，隨雲高增加溫溼剖面反演的效果減小，當雲高在 800hPa 以上時只有溫度剖面有些微的改進，水汽則無改進。至於部分雲遮的反演情形，溫溼剖面的改進程度，也隨雲高的增加而不明顯，實驗顯示雲高在 1000hPa 到 800hPa 的反演溫、溼剖面效果十分良好，雲高在 800hPa 到 700hPa 時對背景場仍具修正的效果。但較微弱。實驗的結果也發現若雲量在 0 到 0.35 之內時，雲高比較高時也能得到較好的反演結果。由以上的分析結果，我們可以發現有雲的視場溫溼剖面反演的好壞，會隨雲參數的不同而不同，掌握更為精確的雲參數情形，可以提供後續使用這筆資料的參考，而使得有雲視場的資料的使用更具潛力。

誌 謝

本文蒙中央氣象局科技中心陳雯美小姐在資料提供與程式方面之協助，衛星中心張拱祿課長、廖美慧小姐在衛星資料處理方面的建議，中大黃清勇教授的指導特致謝意。本文在國科會計畫 NSC88-2111-M-008-026-API 支持下完成。

參考文獻

- 曾忠一，1988：大氣衛星遙測學。國立編輯館主編，渤海堂出版，台北市，630 頁。
- 曾忠一，1997：氣象資料同化。國立編譯館主編，渤海堂出版，台北市，594 頁。
- 劉振榮、陳萬金，1992：同時物理反演法在 TAMEX 期間反演結果之分析。*大氣科學*，**20**，135-152
- Andersson, E., A. Hollingsworth, G. Kelly, P. Lonnerberg, J. Pailleux, and Z. Zhang, 1991: Global observing system experiments on operational statistical retrievals of satellite sounding data. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1851-1864.
- Anderson, E., J. Pailleux, J.-N. Thepant, J. R. Eyre, A. P. McNally, G. A. Kelly, and P. Courtier, 1994: Use of cloud-cleared radiances in three/four-dimensional variational data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **120**, 627-653.
- Aoki, T., 1980: A method for matching the HIRS/2 and AVHRR pictures of TIROS-N satellites. *Tech. Note No 2*, Met. Sat. Center, Tapan, 15-26.
- Bengtsson, L., 1985: Medium-range weather forecasting at ECMWF. *Adv. Geophys.*, **28B**, 128-143.
- Chedin, A., N. A. Scott, C. Wahiche, and P. Moutinier, 1985: The improved initialization inversion methods: a high resolution physical method for temperature retrievals from the TIROS-N series. *J. Climat. Appl. Meteorol.* **24**, 128-143.
- Eyre, J. R., 1989: Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal estimation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 1001-1237.
- Eyre, J. R., 1992: A bias correction scheme from simulated TOVS brightness temperatures. *ECMWF Tech Memo* **186**.pp28
- Eyre, J. R., G. A. Kelly, A. P. McNally, E. Anderson, and A. Persson, 1993: Assimilation of TOVS radiance information through one dimensional variational analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 1427-1463.
- Kashiwagi, K., 1987: On the impact of space-based observing systems in the JMA global forecast/analysis system. *J. Meteorol. Soc. Japan.*, **65**, 189-219.

- Kelly, G., E. Andersson, A. Hollingsworth, P. Lonnberg, J. Pailleux, and Z. Zhang, 1991: Quality control of operational physical retrievals of satellite sounding data. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1866-1880.
- Lorenc, A. C., 1986: Analysis methods for numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 1177-1194.
- Phalippoul, L., 1996: Variational retrieval of humidity profile, wind speed and cloud liquid-water path with the SSM/I: Potential for numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 327-355.
- Rodgers, C. D., 1976: Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. *Rev. Geophys. Space. Phys.*, **14**, 609-624.
- Smith, W. L., H. M. Woolf, C. M. Hayden and A. J. Schrenier, 1985: The simultaneous export retrieval package. Pp. 224-253 in Tech. Proc. 2nd International TOVS Study Conf. Igls, Austria, 18-22 February 1985.
- Ed. W.P. Menzel, Report of CIMSS, Univ of Wisconsin-Medison.
- Sasaki, T., 1958: An objective analysis based on the variational method. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **36**, 738-742.
- Sasaki, T., 1970: Some basic formalisms in numerical variational analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **98**, 875-883.
- Saunders, R. W. and K. T. Kriebel, 1988: An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances for AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, **90**, 123-150.
- Taylor, B. F., C. M. Hayden, W. L. Smith, 1985: The determination of HIRS scene temperature from AVHRR data. *TOVS- II conference*.
- Wu, W.S. and J.C. Derber, 1997: Direct use of TOVS radiances in NCEP's SSI analysis system. Proceedings of Meteorology, Conference Weather Analysis and Forecasting, March 3-5, 1997, Taipei, ROC

Application of AVHRR Data to One Dimensional Variational Retrieval Scheme for TOVS Data

Chien-Ben Chou^{1 2}

¹Meteorological Satellite Center, Central Weather Bureau

²Institute of Atmospheric Physics, National Central University

(Manuscript received 13 November 1998 ; in final form 31 December 1998)

ABSTRACT

The one dimensional variational method has been adopted to retrieve the profile of atmosphere temperature and humidity from TIROS Operational Vertical Sounder TOVS radiances data for using in the data assimilation. And it has been found that a reasonable initial guess of the cloud parameters is useful in speeding the convergence, and it is often essential for obtaining convergence (Eyre 1989). The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) pixels coincident with each TOVS field-of-view can be analysed to obtain more accurate cloud parameters. The purpose of this study is to understand the impact on retrieval of cloudy TOVS radiances by one dimensional variational method, when using more accurate initial guess of the cloud parameter from AVHRR data.

The result show that 76% samples was convergent for cloudy cases, and 88% samples was convergent for partly cloudy cases. The iteration in calculating was kept under 5 times for both conditions. The AVHRR data is useful on getting more reasonable analysis cloud parameter, but no significant benefit was found on the analysis of temperature and humidity profile.

By utilizing AVHRR data more accurate analysis of cloud parameter was obtained. So the cloud scenes can be classified by cloud situation. We found that the retrieved temperature and humidity profile from cloud scenes in the following situations is as good as those from clear scenes:

- (1) cloudy case with cloud top under 900 hPa;
- (2) partly cloudy case with cloud top under 800 hPa, and;
- (3) partly cloudy case with cloud top above 800 hPa, but cloud amount smaller than 0.35

Improvement is slight for temperature, for which the reduction of r.m.s error is about 0.2K in the low and middle troposphere. The mixing ratio (g/Kg) in logarithm has show 0.06 improvement in the middle and upper troposphere.

Key words : Retrieval, Data assimilation