

中 華 民 國 氣 象 學 會
「大氣科學」第二十七期第二號抽印本，141—158 頁

Reprinted from Atmospheric Sciences, Vol. 27, No. 2. Page 141—158
The Meteorological Society of the Republic of China

地面微波輻射偵測大氣中可降水量之動態

劉 說 安

國立中央大學太空及遙測研究中心暨太空科學研究所

中 華 民 國 八 十 八 年 六 月
Taipei, Taiwan, Republic of China, June 1999

地面微波輻射偵測大氣中可降水量之動態

劉 說 安

國立中央大學太空及遙測研究中心暨太空科學研究所

(中華民國八十七年六月四日收稿；中華民國八十八年四月十九日定稿)

摘 要

我們利用水氣微波輻射儀(Water Vapor Radiometer; WVR)觀測大氣中的可降水量(Precipitable Water Vapor; PWV)及液態水(Cloud Liquid Water; CLW)路徑總含量，並以觀測結果說明其動態。觀測資料乃於民國八十七年三月十八日到二十五日間在台北氣象站所蒐集，包含了 23.8 及 31.4 GHz 兩種頻率的亮度溫度(亮溫)。觀測時水平角設定在東西及南北走向兩方向轉換，仰角則設定在 15°(北/東)及 165°(南/西)間，每 15°做一次觀測。水氣微波輻射儀觀測結果顯示，在天頂方向(仰角 90°)可降水量變化範圍約由晴天的 2.4 cm 到陰雨天的 6.5 cm，液態水則介於晴天的 $0\mu\text{m}$ 到陰雨天的 $7840\mu\text{m}$ 間。在仰角 15°及 165°間觀測結果顯示，成層化(stratified) 大氣之假設，隨著仰角偏離天頂方向而逐漸失真。

關鍵詞：可降水量、液態水、亮溫、光程、輻射偵測

一、前 言

大氣中水份涉及相位變化(凝結、蒸發)時，通常伴隨著極大的能量釋出或吸收機制，這是大氣中不穩定天氣系統形成過程中不可或缺的條件之一。例如，雷雨(thunderstorms)往往肇始於強烈上升氣流導致巨量水氣分子凝結釋放潛熱，爾後，雨滴形成、破雲而下，藉由摩擦力帶動空氣下降，導致劇烈的下降氣流，如此機制使得巨大的積雲產生豪雨、閃電、強風等(Christopherson

1995)。又及，微爆流(microburst)形成機制亦然，不同於雷雨者為其尺度較小。然而，雷雨及微爆流同樣對飛航安全造成極大的威脅。由於這類天氣系統肇始時，必須有足夠的水氣，因此藉由觀測水氣分佈，不僅可以促進對天氣系統變化的了解，更可以有效謀定降低天氣系統對飛航安全影響的策略。

回顧過去，許許多多大氣科學家，竭盡所能發展各式各樣的方法，去估計大氣中水氣含量，

甚至其垂直、水平分佈。除了在非常低溫或非常高或低相對濕度，氣球探空法可以相當準確地測量溫度及濕度剖線(Nash and Suhmidlin 1987; Ahnert 1991; Shea et al. 1994; Luers and Eskridge 1995)，其中，溫度準確在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 內，濕度準確度在幾個百分點內，氣球探空偵測範圍可以從接近地面到 30 公里高處，其垂直解析度可以高達幾十公尺以內。然而由於此法非常不經濟，一般在一個觀測站，一天內只有兩次觀測，更何況氣球探空法只能提供一維大氣剖線資訊，對了解即時區域天氣系統助益有限。至於在晴天可以用來觀測溫濕及反射係數分佈的光達(lidars)，在陰天中則受到雲的影響而表現極差(Solheim et al. 1998a)。

鑑於飛航安全會受到天氣系統的影響，例如伴隨雷雨下爆風(thunderstorm downburst winds)的強烈風切(wind shear)為飛機失事的第二大肇因(僅次於人為操作錯誤)(Lyons 1997)，又鑑於配合飛航安全的設施，必須全天候且不受天氣影響的情況下運作，應用不受天候影響的微波輻射量測技術，偵測大氣的溫、濕度分佈資訊，掌握即時的天氣動態，並發展相關預測技術，頗值得我們探討。衛星微波輻射計量降雨與水氣之相關研究不勝枚舉(Alishouse 1990; Schluessel and Emery 1990; Liu and Wentz 1992; Gao et al. 1992; Schulz et al. 1993; Bauer and Schluessel 1993; and Sierk et al. 1997)，地面微波輻射計量大氣中水氣及液態水總量與剖線之研究也是多如牛毛(Westwater 1978; Hogg et al. 1983; Sheppard et al. 1991; Han and Westwater 1995; Westwater 1997; Sierk et al. 1997; Solheim et al. 1998a; Snider and Hazen 1998; and Frate and Schiavon 1998)。此外，與飛航安全相關的如 Hill(1991)以地面輻射計觀測大氣中影響飛安的過冷水剖線，以及 Solheim(1991)在美國

Boulder 應用地面輻射計觀測到丹佛(Denver)機場飛機失事時，大氣中過冷水含量有異常升高現象，致使失事前，疊積足夠的冰在飛機上。

有鑑於國內地面微波輻射計量大氣參數之相關研究較有限，而我們在微波輻射量測有些許經驗，研究主題包含了地面水文(Liou and England 1996, 1998a and 1998b; Liou et al. 1998, 1999a, 1999b, and 1999c; 劉 1998)及大氣水文(劉及楊 1999; Liou and Teng 1999)，預期藉由剖線微波輻射計，提供即時大氣溫、濕度分佈資訊，隨時掌握可能影響飛航安全的不穩定天氣系統，具有適時預警、減低飛航事故的潛力。因此，我們已規劃一個的長期目標，在於發展微波輻射偵測大氣中 PWV 及 CLW 剖線動態的技術。為了這一個目標，本文中首先介紹較為初級的微波輻射偵測大氣中 PWV 及 CLW 總含量動態的技術，設定 23.8 及 31.4 GHz 雙頻水氣微波輻射儀在東西及南北走向兩方向轉換，並且設定仰角在 15° 及 165° 間，每 15° 做一次觀測估計大氣中的 PWV 及 CLW 的動態。

一般在遙測領域之研究，在粹取物理量資訊的過程中，通常包含兩個步驟，其一為建造前進(forward)模式，裨益應用足夠、具有代表性之物理量帶入模式，以產生預期之觀測量;其二為建造後退(backward)模式、在於應用前進(forward)模式的產物，建立觀測量與物理量間關係(Ulaby et al. 1986)。對於前述第一步驟，文獻上慣用的方法為應用氣球探空資料提供大氣狀態(溫、水氣、雲水、壓力剖線)，產生水氣及雲水之總量或剖線與預期之亮溫觀測量(England et al. 1993; Westwater 1997; Jung et al. 1998; Barbaliscia et al. 1998; Snider and Hazen 1998; and Solheim et al. 1998a)，繼而找出其間關係。本研究延此慣例，因此於下

一節中，首先敘述輻射傳送模式(前進模式)，應用氣球探空資料提供大氣狀態，產生 PWV 及 CLW 和預期之 23.8 及 31.4GHz 亮溫觀測量，並找出其間關係。再於次一節應用該關係於水氣微波輻射儀觀測實驗，以估計 PWV 及 CLW，並用氣球探空資料驗證 PWV。由於氣球探空資料並未提供 CLW 觀測資訊且無其他釋當觀測 CLW 器材，因此我們以下無法談論 CLW 之驗證。

二、輻射偵測 PWV 及 CLW 含量原理

微分形式輻射傳送方程可寫成爲(Ulaby et al.1981)

$$\frac{dB(r)}{d\tau(r)} + B(r) = J(r) \quad (1)$$

其中，

- B 是亮度 (brightness), $W/m^2\text{-sr}^1$
- r 是位置(距離), m
- τ 是光程(optical depth), neper (Np)
- J 是源函數(source function), $W/m^2\text{-sr}$ 。

從式(1)可以推得地面輻射計觀測到的大氣輻射(積分形式)爲

$$B_g = B(\infty)e^{-\tau(0,\infty)} + \int_0^\infty J(r)e^{-\tau(0,r)} \frac{d\tau}{dr} dr \quad (2)$$

其中，

$$\tau(r, r^1) \equiv \int_r^{r^1} \kappa_e(r'') dr'' \quad (3)$$

其中， κ_e 爲大氣的消散係數(extinction coefficient),

Np/m。在微波波段，根據 *Rayleigh-Jeans* 法則我們可以改寫式(2)爲

$$T_{bg} = T_{bc}e^{-\tau(0,\infty)} + \int_0^\infty \kappa_e(r)T_a(r)e^{-\tau(0,r)} dr \quad (4)$$

其中，

- T_{bg} 爲地面輻射計觀測之亮溫，K
- T_{bc} 爲宇宙背景亮溫(2.7°)，K
- T_a 爲大氣溫度，K。

一般而言，在低微波波段大氣散射效應較弱可忽略不計，故可以用吸收係數取代式(3)及(4)中的消散係數。由於水份含量及相位主宰大氣在某些微波波段的輻射強度，因此，可以利用這些波段來觀測大氣中的 PWV 及 CLW 分佈，例如，22.235 GHz 水氣吸收頻帶及 50-70 GHz 氧氣吸收頻帶分別被用來觀測 PWV 剖線及溫度剖線。在這兩個微波波段 CLW 的吸收係數隨頻率增加而增大，其組合可以用來估計 CLW 剖線(Solheim et al. 1998a)。同理，吾人可以利用 22.235 GHz 水氣吸收頻鄰近頻率，尤其如幾乎不受壓力擴張(pressure broadening)影響的 21.6 或 23.8 GHz 觀測大氣中的 PWV 含量，再加上一個稍高頻率之觀測可以用來估計 CLW 含量，例如，本研究中使用 23.8 及 31.4 GHz 的組合。若以式子表示，大氣中的 PWV, cm, 及 CLW, μm , 含量分別可寫成

$$PWV = C_{PWV0} + C_{PWV1} \times Tb_1 + C_{PWV2} \times Tb_2 \quad (5)$$

$$CLW = C_{CLW0} + C_{CLW1} \times Tb_1 + C_{CLW2} \times Tb_2 \quad (6)$$

其中，

- C_i 以亮溫爲基準之迴歸係數，下標 i

代表 $PWV0, PWV1, PWV2, CLW0, CLW1$ 及

¹ Sr 爲立體角 steradian 之縮寫。

CWL2

• Tb_i 為觀測之亮溫，K，下標 $i=1$ 或 2 分別代表 23.8 及 31.4 GHz。

推導亮溫估計 PWV 及 CLW 含量之迴歸公式時，蒐集了民國七十七年到八十六年的氣球探空資料做分析，以 NOAA Wave Propagation Laboratory 發展的輻射傳送模式估計大氣輻射在 23.8 及 31.4 GHz 的亮溫(Schroeder and Westwater 1991)。該模式以氣球探空觀測之溫、濕、壓剖線外插至 0.1 hPa，以 PWV、CLW 及氧氣為主要吸收成份。茲特別說明，氣球探空資料並未提供 CLW 資訊，因此，一般作法是假設相對濕度在超過某一參考值時 CLW 即存在。這樣的假設提供一個“半真實大氣”剖線，可以充分配合前進(forward)模式，適當地描述大氣剖線(Han and Westwater 1995; Solheim et al. 1998a; Snider and Hazen 1998)，以積分模式估得 PWV 及 CLW 總含量及輻射傳送模式估計大氣的亮溫及光程，如此一來，即可進一步推導迴歸公式。由於前述相對濕度之假設自由度較大，選定時需特別小心(Westwater 1978)。本研究之液態水量係以濕絕熱(moist adiabatic)方式估計(Albrecht et al. 1990; Han and Westwater 1995)，假設絕熱液態水混合比率(mixing ratio)隨高度變化與絕熱水汽混合比率隨高度變化，相等而異號，即 $dw_l/dz = -dw_v/dz$ ，其中， $w_v = \epsilon e_v / (p - e_v)$ ， ϵ 為 0.622， p 為大氣壓力，以及 e_v 為水汽分壓。因此，CLW 總含量即為 $(\int_{z_1}^{z_2} \rho_a w_l dz) / \rho_l$ ， ρ_l 為液態水之密度， ρ_a 為空氣之密度，以及 z_1 及 z_2 為液態水存在之範圍。

為了配合微波輻射計辨識 CLW 的存在與

否，按照我們涉獵，只有利用雷射雲高計(LASER ceilometer)配合，如 Han and Westwater (1995)。至於用來觀測降水量的雷達，對於仍然可影響大氣輻射但較微小的水滴不靈敏，我們並未發現相關文獻。Han and Westwater (1995)分別假設 CLW 在相對濕度超過 90%及 95%時才存在，配合雷射雲高計之雲高觀測，發現在前者假設情況下，微波輻射計量之雲底與雷射雲高計之雲底較為一致。然而，Solheim (1998b)則使用 93%或 94%。雖然採用多少的相對濕度值並無定論，但是氣球探空之相對濕度觀測尚有幾個百分點誤差，因此以上使用之相對濕度值，實際上可視為同一精度範疇。本文中，同時比較 90%、94%及 98%三種假設，並且配合實驗觀測時間，僅用三月間的氣球探空資料來推導迴歸公式，目的在於減少季節性導致迴歸之誤差。

限於有限觀測器材，我們無法採用 Han and Westwater (1995)的方式驗證微波輻射計量 PWV 及 CLW 技術，即無雷射雲高計之配合(如 Snider and Hazen 1998)。然而，我們對所掌握資料進行兩種測試，以說明所掌握資料方法的合理性。第一為迴歸公式測試，第二為輻射計量 PWV 及氣球探空資料之比對(敘述於第三節)。氣球探空雖然沒有直接的 CLW 觀測，但應用較長時間尺度下的資料推導迴歸，相對濕度可能與 CLW 有某種相關性，所以氣球探空資料才為前面所引諸多文獻所使用。

在迴歸公式測試時，以氣球探空資料估計之 23.8 及 31.4 GHz 亮溫帶入式(5)及(6)，並將結果與以氣球探空資料直接求得之 PWV 及 CLW 做比較，發現均方根差在 90%時分別小於 0.44 cm (11.7%)及 508 μ m (28.9%); 在 94%時分別小於 0.36 cm (9.5%)及 405 μ m (39.7%); 在 98%時分別

小於 0.25 cm (6.5%)及 215 μ m (53.2%)。若以大氣的光程推導迴歸，則相對的均方根差在 90%時分別降到 0.19 cm (5.0%)及 302 μ m (17.2%); 在 94%時分別降到 0.18 cm (4.8%)及 198 μ m (19.4%); 在 98%時分別降到 0.18 cm (4.7%)及 110 μ m (27.4%)。如表一所示為依據民國七十七年到八十六年三月間的氣球探空資料，求得之 PWV 及 CLW 的平均值與標準差，以及以 23.8 及 31.4 GHz 之亮溫與光程分別迴歸所得結果與直接由氣球探空資料求得之 PWV 及 CLW 間的均方根差。括弧內 Tb 及 τ 分別代表以大氣亮溫與光程推導迴歸。平均值為物理量統計的平均；標準差代表相關物理量散異程度，例如 CLW 的 285%顯然大於 PWV 的 22.6%(導致隨後迴歸的難度)；均方根差代表迴歸公式品質的良窳。就 98%個案而言，CLW 之均方根差比 PWV 高出甚多(以百分點計)，主要是因 CLW 的標準差相對地大許多(285%對 22.6%)。測試顯示在 98%時迴歸的 PWV 含量較 90%及 94%吻合氣球探空資料之相對值，而 CLW 則是絕對誤差較小但百分點較大，如圖 1 所示，98%時的迴歸較 90%及 94%集中於 1:1 的線上。此外，光程迴歸結果較亮溫迴歸結果合理，所以，除非另述，本文自此以 98%案例之光程迴歸結果做分析。以光程迴歸 PWV 及 CLW 時，只要以光

程取代式(5)及(6)中之亮溫即可，如下

$$PWV = \hat{C}_{PWV0} + \hat{C}_{PWV1} \times \tau_1 + \hat{C}_{PWV2} \times \tau_2 \quad (7)$$

$$CLW = \hat{C}_{CLW0} + \hat{C}_{CLW1} \times \tau_1 + \hat{C}_{CLW2} \times \tau_2 \quad (8)$$

其中，

- $\hat{C}_i$ 以光程為基準之迴歸係數，Np，下標 i 代表 $PWV0, PWV1, PWV2, CLW0, CLW1$ 及 $CLW2$
- τ_i 為觀測亮溫推得之光程，K，下標 $i=1$ 或 2 分別代表 23.8 及 31.4 GHz。

光程與亮溫之關係為

$$Tb = T_{bc} \times e^{-\tau(\infty)} + [1 - \tau(\infty)] \times T_{mr} \quad (9)$$

其中，

- $\tau(\infty)$ 為大氣之總光程(以下以 τ 表示)，
- T_{mr} 代表大氣的平均輻射溫度(mean radiating temperature)，以式子表示如下

$$T_{mr} = \frac{\int_0^\infty \kappa_a T_a e^{-\int_0^s \kappa_a dr} ds}{\int_0^\infty \kappa_a e^{-\int_0^s \kappa_a dr} ds} \quad (10)$$

其中， κ_a 為大氣的吸收係數(absorption coefficient)，Np/m， ds 代表微小位置變量，m。

表一 依據民國七十七年到八十六年三月間的氣球探空資料，求得之PWV及CLW的平均值與標準差，以及以23.8及31.4 GHz之亮溫與光程分別迴歸所得結果與直接由氣球探空資料求得之PWV及CLW間的均方根差。括弧內 Tb 及 τ 分別代表以大氣亮溫與光程推導迴歸，使用的 Tb 迴歸係數為 $PWV0= -0.60, PWV1= 0.11, PWV2= -0.063, CLW0= -500.3, CLW1= -11.4$ 及 $CLW2= 40.5$ ， τ 迴歸係數為 $PWV0= -0.22, PWV1= 23.98, PWV2= -14.31, CLW0= -232.9, CLW1= -1684.5$ 及 $CLW2= 6582.1$ 。

參數\項目	平均值	標準差(百分點)	均方根差(Tb)	均方根差(τ)
PWV, cm	3.79	0.856 (22.6%)	0.25 (6.5%)	0.18 (4.7%)
CLW, μ m	403	1148.6 (285%)	215 (53.2%)	110 (27.4%)

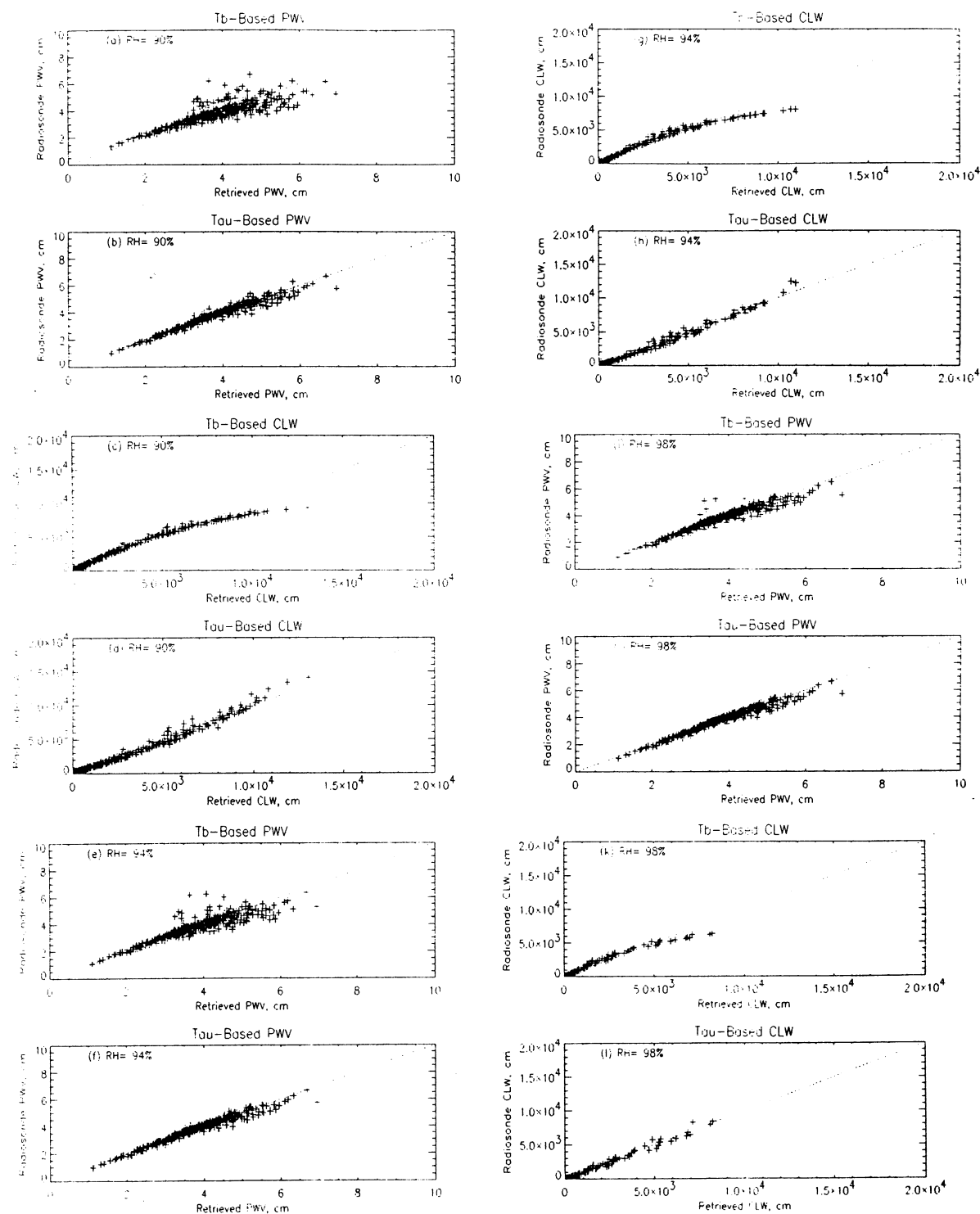


圖 1 根據民國七十七年到八十六年台北氣象站的氣球探空資料，在三種 90%、94%及 98%假設時估得的 PWV 及 CLW 總含量，及其相對應分別以 23.8 及 31.4 GHz 亮溫及光程估得的值。虛線代表 1:1 情況。氣球探空資料僅用於提供一個半真實大氣剖線。

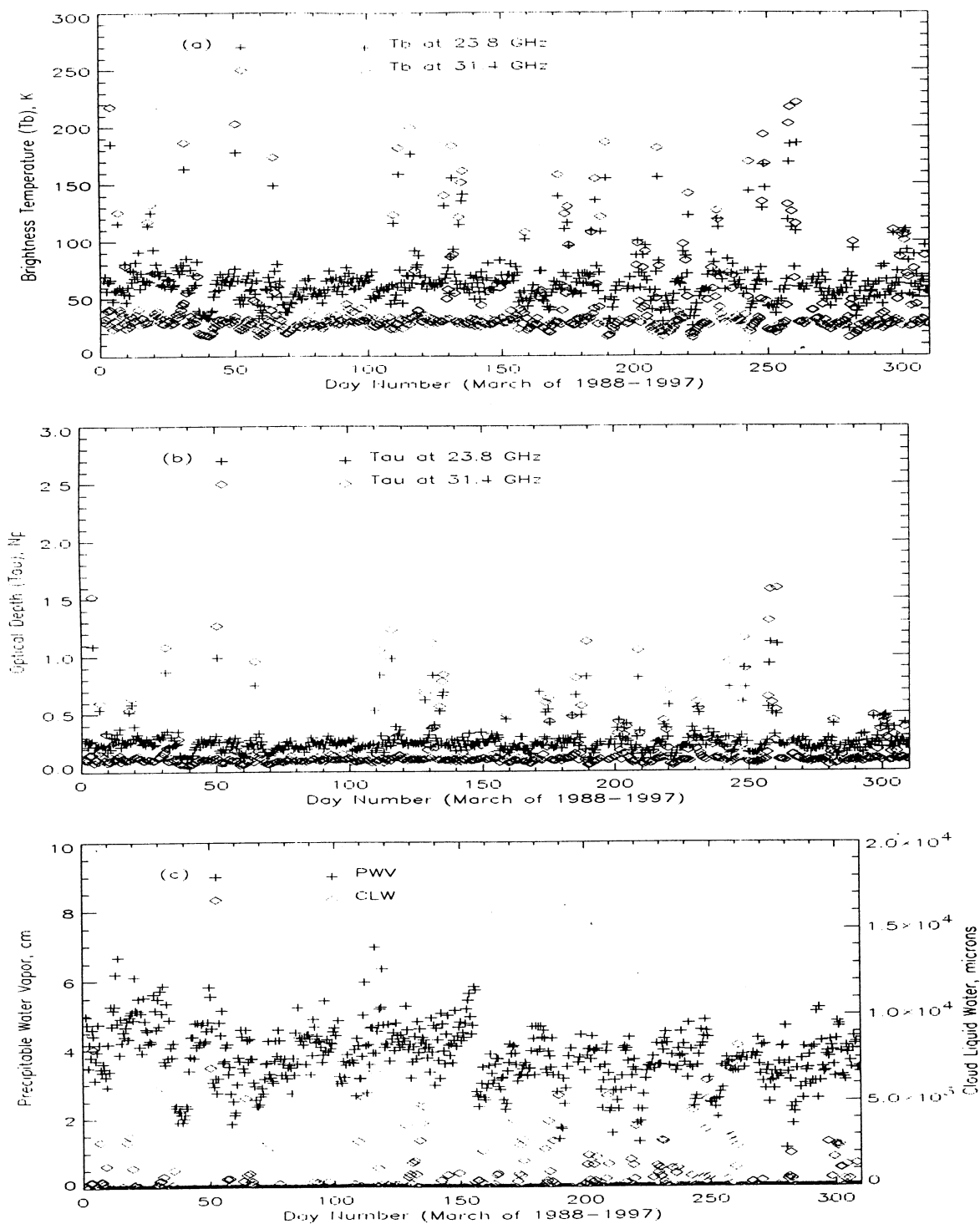


圖 2 根據民國七十七年到八十六年台北氣象站的氣球探空資料，以 98% 案例所估計 23.8 及 31.4 GHz 之大氣(a)亮溫及(b)光程，及其相對應的(c)PWV 及 CLW 總含量。氣球探空資料僅用於提供一個半真實大氣剖面。

圖 2 為根據民國七十七年到八十六年的氣球探空資料，估計所得大氣在 23.8 及 31.4 GHz 的(a)亮溫及(b)光程，以及相對的(c)PWV 及 CLW 總含量。在這十年間，大氣亮溫在 23.8 及 31.4 GHz 的平均值分別為 65.7 及 40.8 K，相對的標準差(百分點)分別為 23.5 (35.7%)及 34.0 (83.5%) K。一般而言，大氣的輻射量隨著 PWV 或/及 CLW 總含量增加而遞增，即亮溫及光程隨之遞增。因為 31.4 GHz 受液態水影響較大，而 CLW 相對的變化較大，所以其標準差(百分點)較大。

三、觀測實驗與結果分析

實驗觀測於民國八十七年三月十八日到二十五日間在台北氣象站進行，水氣微波輻射儀架設於不銹鋼架上，儀器主體設定在東西及南北走向兩方向轉換，而天線反射鏡旋轉方向與儀器主體走向成正交，實驗中重覆掃描 15°及 165°間仰角(每 15°做一次觀測)。在為期一週的實驗中，每一個觀測角共蒐集了 383 組 23.8 及 31.4 GHz 兩種頻率的亮溫資料。本研究使用之水氣微波輻射計為美國 Radiometrics 公司所提供，操作頻率為 23.8 及 31.4 GHz，選用 23.8 GHz 有兩大考量：1. 該頻率接近水氣吸收頻且幾乎不受壓力擴張影響；2. 該頻率免於衛星下鏈傳輸(downlink transmissions)的影響。其解析度為 0.25 K，半功率頻寬(beamwidth)在 23.8 及 31.4 GHz 分別為 5.7°及 4.4°。其它特色簡述如后：1. 以液態氮及環境溫度為準不時地自我校正；2. 以步進馬達控制基座水平旋轉(3 度/秒)及天線反射鏡仰角(90 度/秒)變化；3. 經介面由電腦控制，達到自動化觀測；以及 4. 被動式儀器不影響其他(如機場)作業之電波訊號。

為了進一步評估前述 90%、94%及 98%三種

相對濕度值假設之合理性，圖 3 比較氣球探空估得在天頂方向 23.8 及 31.4 GHz 的亮溫及其相對應 WVR 所測得之值。圖 3(a)顯示在 90%時氣球探空同時高估 23.8 及 31.4 GHz 亮溫；(b)則顯示在 94%時氣球探空在 23.8GHz 低估而在 31.4 GHz 時高估亮溫；(c)則顯示在 98%時氣球探空在 23.8 及 31.4GHz 估得亮溫與 WVR 觀測值最吻合。這樣結果肯定前述在迴歸公式測試時之歸納---以 98%案例最適合為本研究所採用。

圖 4 為 WVR 所測得之 PWV 與 CLW 及其相對應氣球探空估得之 PWV 值，整體而言，兩者均相當吻合。我們沒比對 CLW，在於氣球探空並無 CLW 觀測量，且 CLW 的實際觀測實在不易獲得，唯有待未來國內觀測儀器更充實時，藉由更多同步的異質觀測補充，再談 CLW 才會更有意義。比較圖 4 與圖 3，亮溫如預期般地隨著 PWV 或/及 CLW 總含量的增加而遞增。在一週實驗期間，大氣亮溫在 23.8 及 31.4 GHz 的平均值分別為 57.8 及 32.4 K，相對的標準差(百分點)分別為 20.5 (35.4%)及 27.1 (83.7%) K，這些平均值小於民國七十七年到八十六年三月間相對的統計值，差異分別為 7.9 及 8.4 K。這差異歸因於較低的 PWV 及 CLW 總含量。若以光程迴歸所得 PWV 及 CLW 而言，其值分別為 3.43 cm 及 262.5 μm ，均小於相對十年的統計值(3.79 cm 及 403.0 μm ，如表一)，其差異(百分點)分別為 0.36cm (9.5%)及 140.5 μm (34.9%)。這說明大氣輻射特性，在 23.8 及 31.4 GHz 微波兩種頻率，對於 PWV 及 CLW 相當靈敏。兩種頻率之光程在觀測期間均小於 1，其平均值(標準差)在 23.8 及 31.4 GHz 兩種頻率分別為 0.227 (0.136) Np 及 0.126 (0.198) Np，表示在這一週實驗期間，兩種操作頻率對大氣的穿透率仍然相當高。按 WVR 與氣球探空觀測原理及其時空解析

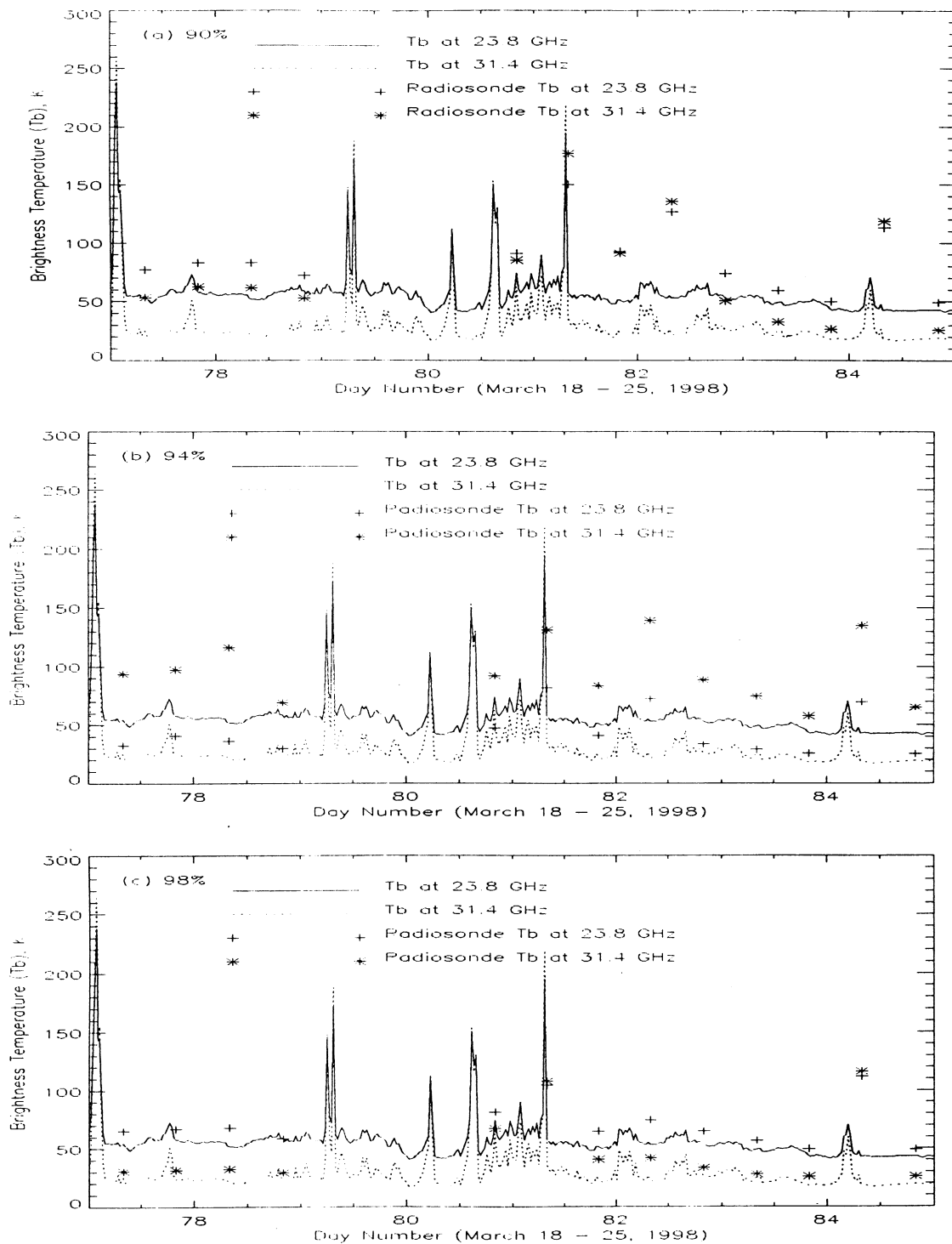


圖 3 民國八十七年三月十八日到二十五日間，台北氣象站氣球探空所測得(a)90%、(b)94%及(c)98%各案例在天頂方向 23.8 及 31.4 GHz 的大氣亮溫，及其相對應的水氣微波輻射儀觀測值。氣球探空資料僅用於提供一個半真實大氣剖線當參考。

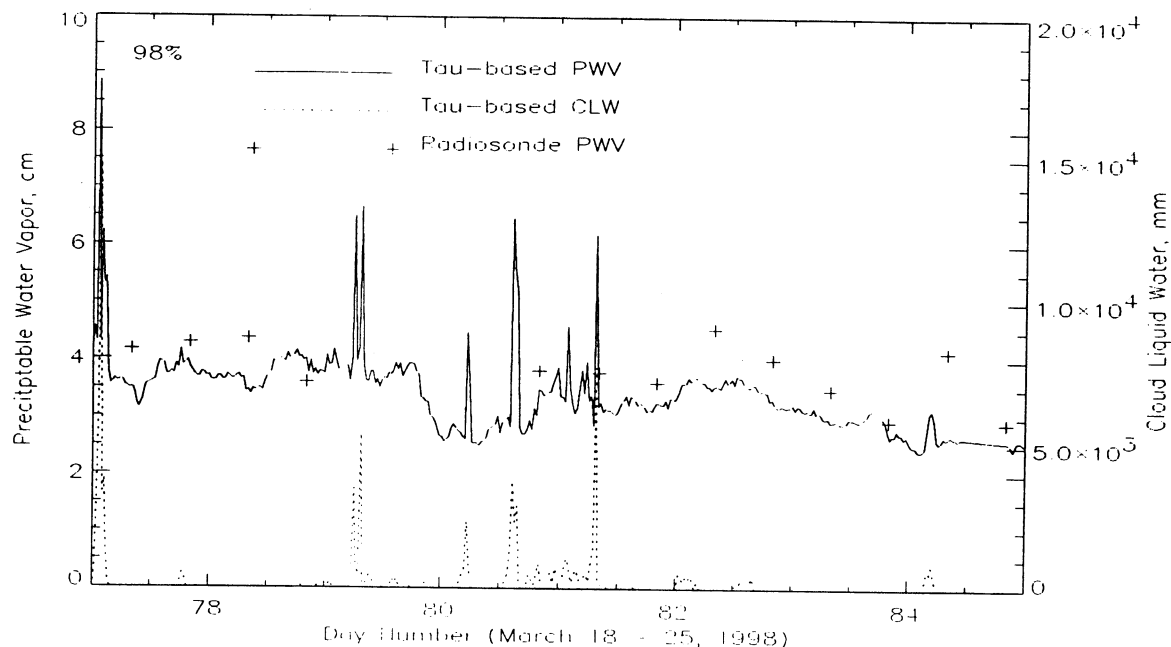


圖 4 民國八十七年三月十八日到二十五日間，以水氣微波輻射儀所估得光程迴歸之 PWV 及 CLW 總含量，及其相對應的氣球探空觀測之 PWV 值。氣球探空資料沒有提供 CLW 之觀測，因此，在此不予以比較。

度截然不同，兩者測得大氣亮溫必然有差異 (Westwater et al. 1990; Rocken et al. 1995)。

圖 5 所示為水氣微波輻射儀主體設定在東西走向時，不同仰角(天線反射鏡在南北方向旋轉)所測得之(a)PWV 及(b)CWL。由圖可知，兩者均隨著仰角的偏離天頂而遞增，其中，前者變化範圍約由天頂方向的 2.4 cm 劇升到偏離天頂 75° (15°及 165°仰角)時的 19.6 cm，後者相對的變化範圍約為 0 μm 到 15,960 μm 間。另外，由同仰角 PWV 及 CLW 含量變化可知，如在三月二十日(day number = 79)到二十二日間之變化較劇烈，水氣微波輻射儀能夠掌握瞬息萬變的 PWV 及 CLW 分佈。由於三月二十日當天的天氣變化較大，茲特將該日午夜到正午間觀測的 PWV 及 CLW 畫出，如圖 6 所示為(a)PWV 及(b)CLW 在不同仰角的觀測。圖中 PWV 及 CLW 含量明顯地增多，前者

變化範圍約由天頂方向的 3.5 cm 劇升到偏離天頂 75°時的 18.8cm，後者相對的變化範圍為 0 到 5480 μm 。

圖 7 所示為日本 GMS 衛星在三月二十日觀測之雲圖，觀測時間分別為(a) 3:32 a.m., (b) 4:32 a.m., (c) 5:32 a.m., (d) 6:25 a.m., (e) 7:32 a.m., 及(f) 8:32 a.m.，雲圖已經強化對比處理，以利目識辨別。綜觀而言，三月二十日當日確有雲系飄過台北地區，唯限於衛星解析度細節無法完全看清。因此，另行於圖 8 展示三月二十日零時至午時地面觀測之低雲(a)種類和(b)量與水氣微波輻射儀觀測離天頂角(c)30 和(d)75 度以內雲水量之平均值。按當時低雲量即為總雲量，茲未(無須)展示相關高雲之資訊。(a)顯示凌晨二時雲之類別為 1，即扁平淡積雲或非惡劣天氣之碎積雲，或兩者均有，而其他時間(五、八、九和十一時)觀測之雲類

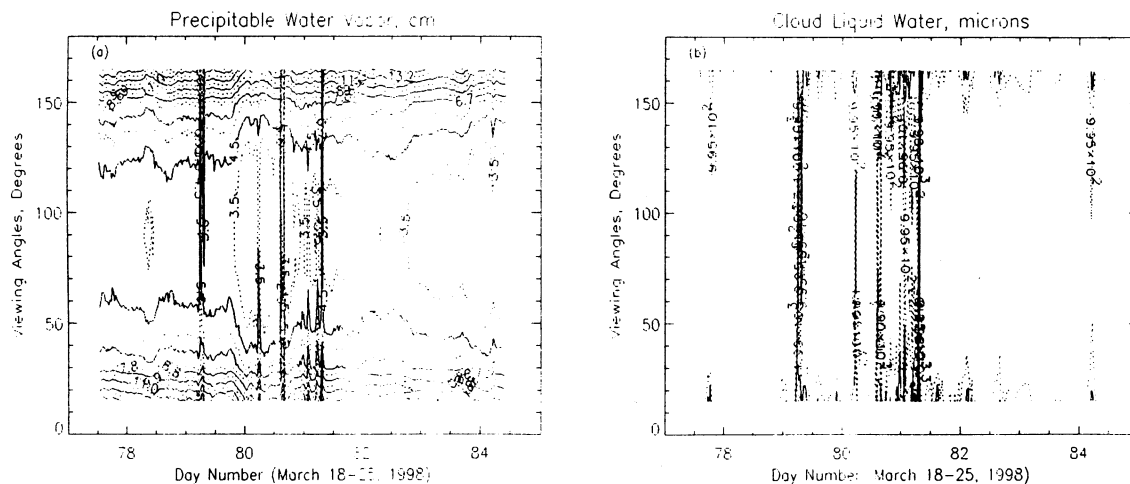


圖 5 民國八十七年三月十八日到二十五日間，水氣微波輻射儀主體設定在東西走向時，以光程迴歸所得在不同仰角(天線反射鏡在南北方向旋轉)的(a)PWV 及(b)CLW 之等濕(含 PWV 及 CLW)線圖。

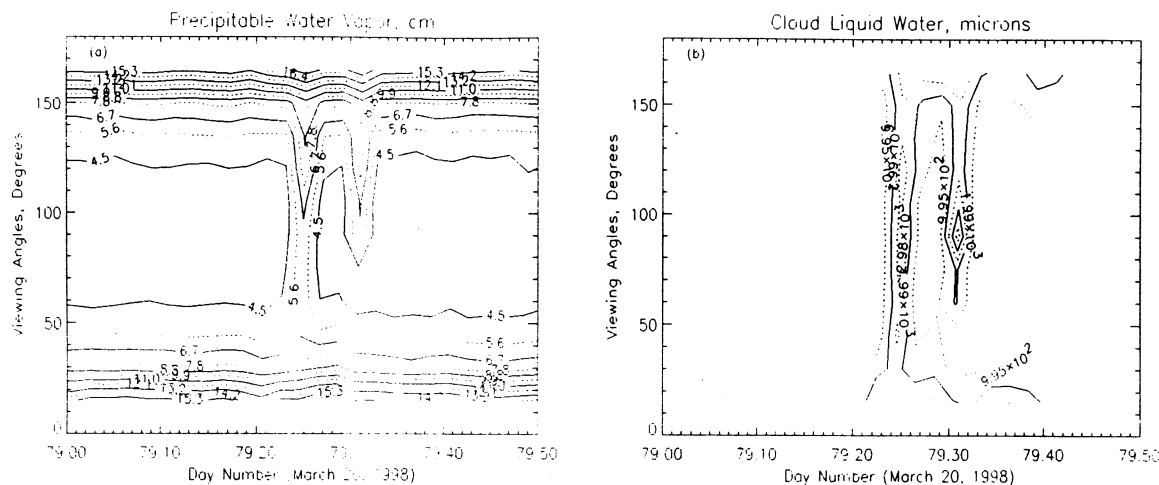
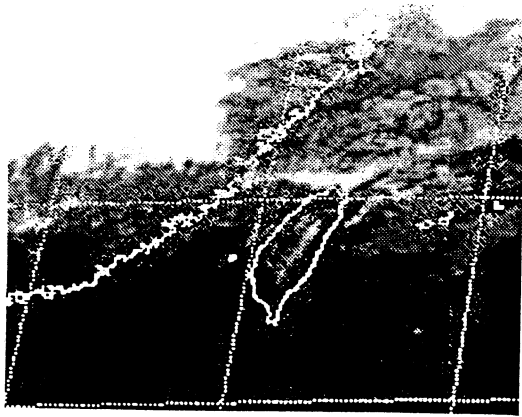


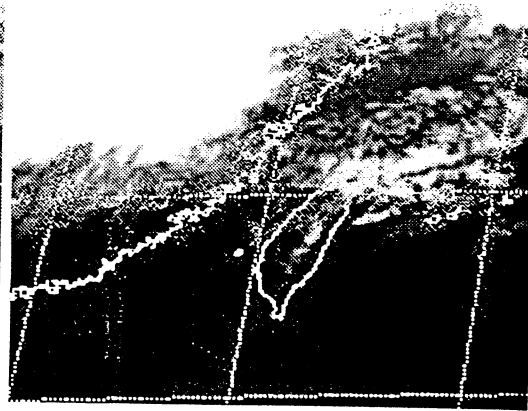
圖 6 民國八十七年三月二十日午夜到正午間，水氣微波輻射儀測得之(a)PWV 及(b)CLW 等濕線圖。

別則全為 5，即非積雲性層積雲，以上時段的雲主要為小水滴所組成(中央氣象局 1986)。(b)顯示凌晨二時之雲量覆蓋百分比為 20~30%，而其他有雲時段則皆為 90%或以上。(c)和(d) 顯示縱使微波輻射儀觀測離天頂 30 度以內無雲水，只要偏離天頂 75°時雲水整天都純存在，只是雲水量可能較

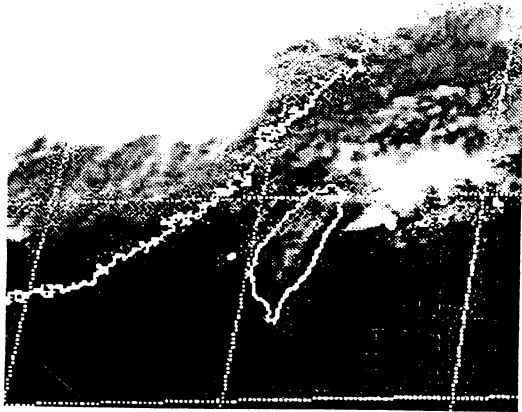
小，如凌晨三、四時(c)中無雲水，而(d)中雲水大致上少於 $200 \mu\text{m}$ ，這些觀測顯然與(a)和(b)之無雲水差異無幾。至於其他時間之觀測，於凌晨五時，輻射儀觀測似乎未如(a)和(b)所預期的多，於早上八、九和十一時，輻射儀觀測較符合(a)和(b)，而於早上六、七時，輻射儀觀測似乎比(a)和



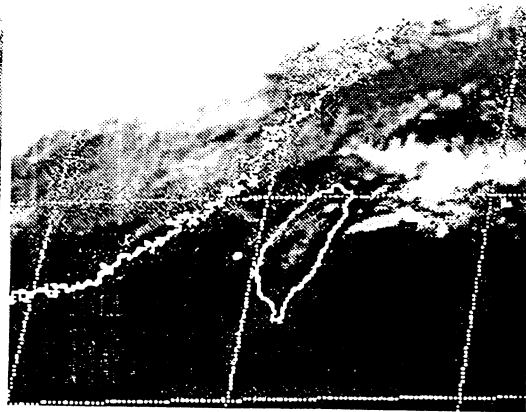
(a) 3:32 a.m.



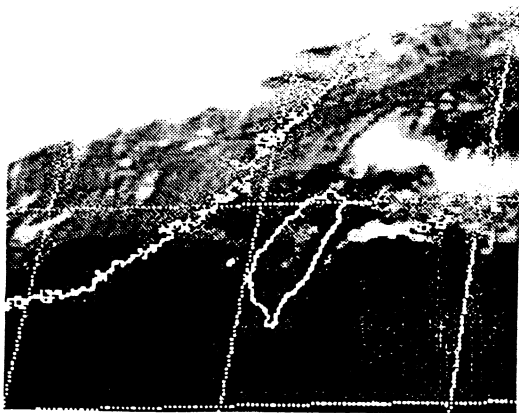
(b) 4:32 a.m.



(c) 5:32 a.m.



(d) 6:25 a.m.



(e) 7:32 a.m.



(f) 8:32 a.m.

圖 7 GMS 衛星在三月二十日觀測之雲圖，觀測時間分別為(a) 3:32 a.m., (b) 4:32 a.m., (c) 5:32 a.m., (d) 6:25 a.m., (e) 7:32 a.m., 及(f) 8:32 a.m.，雲圖已經強化對比處理，以利目識辨別。

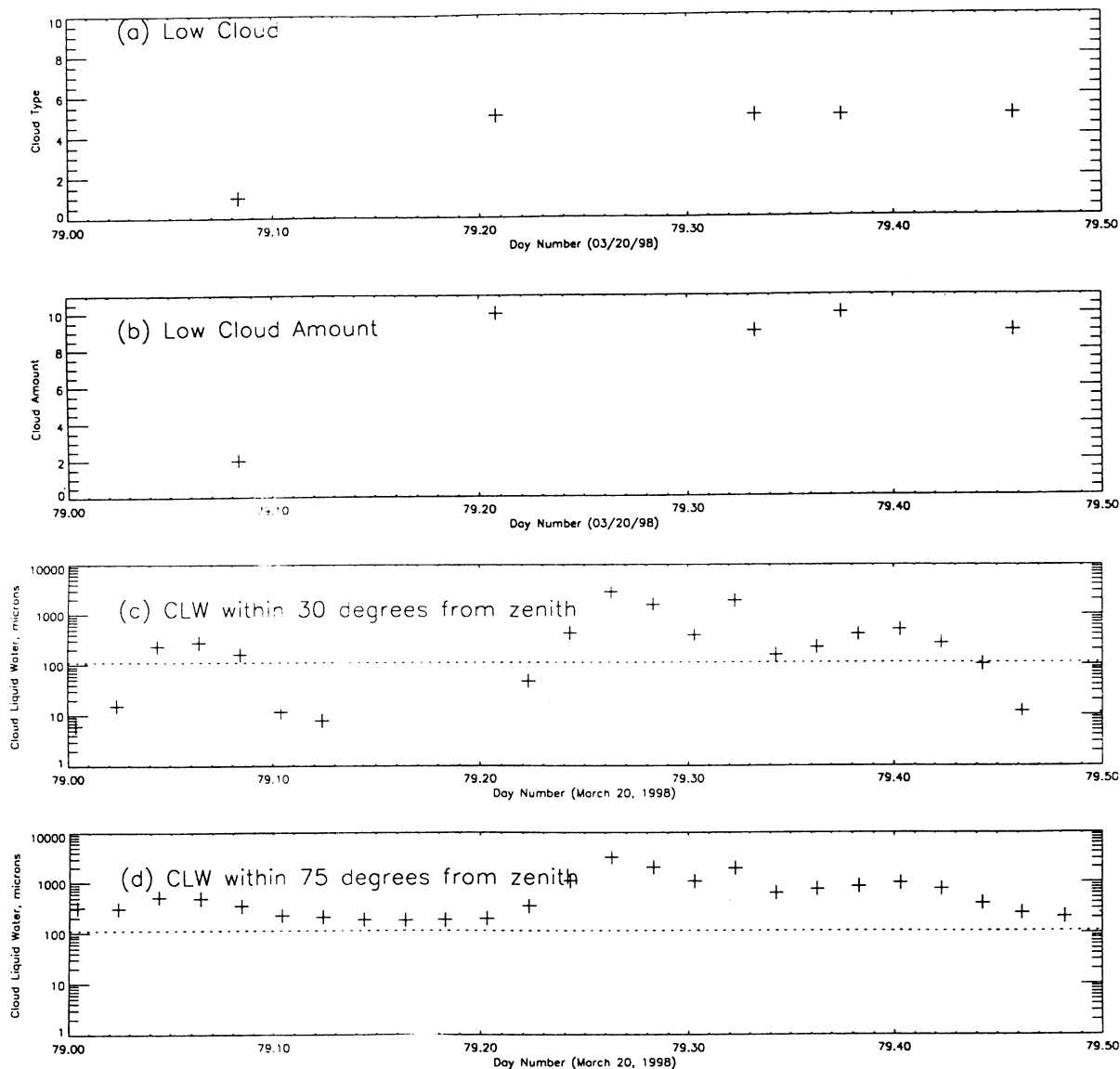


圖 8 三月二十日零時至午時地面觀測之低雲(a)種類和(b)量與水氣微波輻射儀觀測離天頂角(c)30 和(d)75 度以內雲水量之平均值。(c)和(d)中虛線位於 $110 \mu\text{m}$ ，代表光程迴歸 CLW 公式的均方根差。

(b)所預期的多。然而大體上而言，輻射儀和地面觀測間具有相關性。至於其間之差異，我們目前無法完全斷定真正原因，尚需更多的異質觀測資料做為輔助。

圖 9 所示為水氣微波輻射儀設定在東西走向時所測得大氣中(a)PWV 及(b)CLW 總含量的統計值，以及相對於天頂方向的變化行為。其中，垂直線代表同一仰角參數的變化大小，其長度為兩個標準差(請見表三)；星號(*)代表以天頂方向

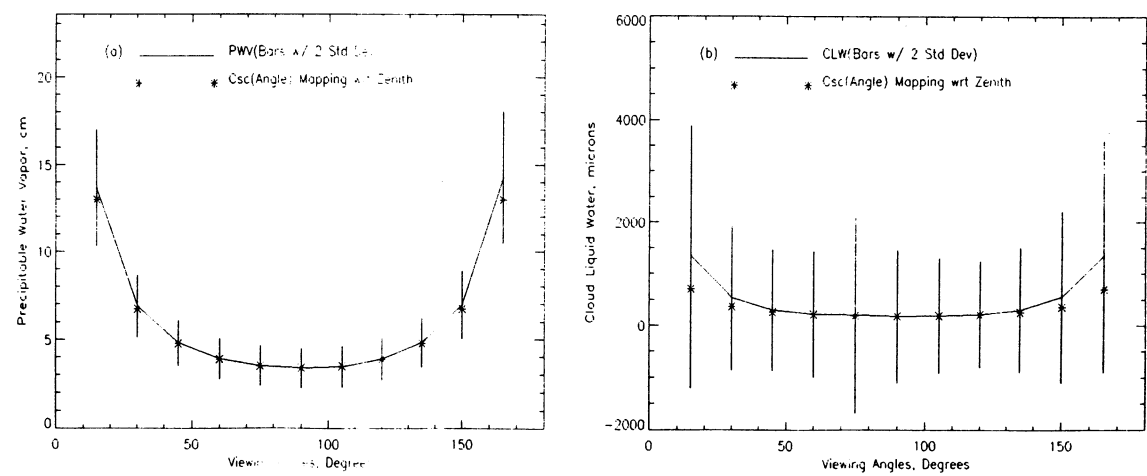


圖 9 民國八十七年三月十八日到二十五日間，水氣微波輻射儀所測得大氣中(a)PWV 及 (b)CLW 總含量的統計值，垂直線長度為兩個標準差，星號(*)代表以天頂方向為基準經仰角反正弦函數映射之值，即偏離天頂方向時(大氣厚度逐漸變大)，PWV 及 CLW 為斜向(slant range)之量。在觀測角近地面(15 及 165 度仰角)時，光程大時 PWV 及 CLW 的標準差(Std Dev)相對地也大。

為基準經反正弦函數²映射之值，明顯地可以看出映射值隨著仰角的偏離天頂而偏離觀測值，對於 PWV 及 CLW 之偏離量(百分點)分別接近 10%及 50%。又及，前者在偏離天頂相同角度時，如 15° 及 165° 之偏離量差異約 4%，如表二所列舉各個

仰角之偏離量(百分點)。11 個仰角的標準差列於表三。表三同時列舉各個仰角的平均值，由表三可以看出，CLW 標準差相對於 PWV 變化大了相當多(以百分點而言)，隱含說明了迴歸 CLW 較 PWV 難。

表二 以天頂方向為基準經反正弦函數映射 PWV 及 CLW 值與觀測值間之偏離量(以百分點表示)。

偏離量(百分點)仰角	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
PWV	5.24	2.74	1.34	0.61	-0.07	0	-0.87	0.12	1.59	3.79	9.29
CLW	47.9	32.1	14.4	4.4	9.2	0	2.2	5.2	15.6	35.6	48.2

² 本文中定義之仰角為 0° 到 180°，當水氣微波輻射儀設定在東西走向時，正北即為 0°，所以取仰角之反正弦函數轉換等於對偏離天頂之角度做反餘弦函數轉換。

當水氣微波輻射儀主體設定在南北走向(東西掃描)時，我們發現十一組不同仰角 PWV 與在東西走向(南北掃描)時的相對觀測量間差異平均值、標準差最大發生在 15 度仰角時，其值為 0.06、0.63cm。就 CLW 而言，相對的差異平均值、標準差分別為 38.4、1020 μ m。

表三 在為期一週的實驗中，PWV 及 CLW 觀測的平均值(標準差)。

仰 角	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
PWV, cm	13.6 (1.7)	6.9 (0.89)	4.8 (0.65)	3.9 (0.58)	3.47 (0.56)	3.36 (0.57)	3.44 (0.58)	3.88 (0.64)	4.81 (0.71)	7.0 (0.97)	14.2 (1.9)
CLW, μ m	1350 (1280)	532 (705)	301 (589)	220 (611)	208 (964)	182 (643)	193 (562)	222 (515)	305 (604)	566 (837)	1360 (1140)

四、結 論

本文以民國八十七年三月十八日到二十五日間在台北氣象站的水氣微波輻射儀觀測實驗為例，介紹輻射儀觀測大氣中 PWV 及 CLW 含量動態的技術，原理根植於 PWV 及 CLW 含量主宰大氣在 23.8 及 31.4 GHz 兩種操作頻率的輻射特性。依據民國七十七年到八十六年共十年三月間的氣球探空資料，發現以大氣亮溫的迴歸公式引起的均方根差對於 PWV 及 CLW 分別為 0.25 cm (6.5%) 及 215 μ m (53.2%)。若以大氣的光程進行迴歸，則相對的均方根差分別降到 0.18 cm (4.7%)及 110 μ m (27.4%)。然而線性迴歸公式屬於較傳統的參數粹取方法，粹取品質受限於物理量與觀測量間非線性之關係，而無法達到最佳狀態，因此如何運用、開發適於處理非線性問題的粹取方法頗值得令人探索，我們正另行評估類神經網路或/及模糊理論的適用性。

實驗顯示 WVR 與氣球探空觀測 PWV 結果相吻合，藉由掃描不同仰角偵測到大氣的動態，成層化大氣之假設如預期般地在仰角偏離天頂時逐漸降低適用性，在天氣變化較劇烈的時候，輻射偵測技術仍然掌握住瞬息萬變的 PWV 及 CLW 分佈，以三月二十日為例，在清晨兩個小時內(6-8 a.m.)，PWV 約由天頂方向的 3.5 cm 劇升到偏離

天頂 75°(15°及 165°仰角)時的 18.8 cm，而天頂方向的 PWV 約由 3.5 cm 劇升到 6.5 cm。這樣的觀測結果明顯建議微波輻射技術具有偵測即時天氣動態的能力，可以提供天氣分析模式起始與約制的 PWV 時空分佈。

鑑於本研究中使用的水氣微波輻射儀僅含 23.8 及 31.4 GHz 兩種頻率，對於解析大氣中可降水量及雲水剖線的能力弱。我們已規劃未來使用更多波道的水氣微波輻射儀，以 22-29 GHz 水氣吸收頻帶及 50-60 GHz 氧氣吸收頻帶，分別用來觀測可降水量剖線及溫度剖線，並用兩頻帶組合估計雲水剖線，可以預期其觀測更具有震撼力。此外，我們也將探討水氣時空變化與天氣系統間關係，進而預測天氣系統的變化(如鋒面、微爆流及雷雨)，希望能提供辨識影響飛航安全天氣系統(如微爆流及雷雨)的資訊。至於雲水含量無法由氣球探空觀測提供，是本文探討輻射計量大氣參數最可能不準確的源頭，未來如何藉由同步之雷達、衛星、雲高計及測雲底溫度計等觀測做進一步剖析，尚待學界共同努力。

致 謝

本研究在太空計畫室建教合作計畫 NSC87-NSPO(A)-PC-FA07-05 支持下完成，特此申謝。作

者並感謝美國 Radiometrics 公司提供水氣微波輻射計，中央氣象局提供觀測場所，台北氣象站陳清得主任及全體員工大力支持觀測實驗，太空及遙測研究中心氣象衛星實驗室提供 GMS 衛星觀測資料，台大郭鴻基教授及審查委員們的指教，台大許武榮教授、中央氣象局楊明仁博士及中大陳台琦教授、劉振榮教授及林沛練教授的寶貴意見。

參考文獻

- 劉說安，1998：一個地表過程/亮溫模組對土壤參數靈敏度的研究。**大氣科學**，**26**，95—108。
- 、楊名，1999：GPS 估算可降水量：WVR 約束法，**大氣科學**，**27**，131—140。
- 中央氣象局，1986：2 地面氣象測報作業規範。292 頁，中央氣象局編印。
- Ahnert, P. R., 1991: Precision and comparability of National Weather Service upper air measurements. *Seventh Symp. on Meteorological Observations and Instruments*, New Orleans, LA, Amer. Meteor. Soc., 221--226.
- Alishouse, J. et al, 1990: Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/I. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **28**, 811—816.
- Barbaliscia, F., E. Fionda, and P. G. Masullo, 1998: Ground-based radiometric measurements of atmospheric brightness temperature and water contents in Italy. *Radio Sci.*, **33**, 697—706.
- Bauer P., and P. Schluessel, 1993: Rainfall, total water, ice water and water vapor over sea from polarized microwave simulations and SSMI data. *J. Geophys. Res.*, **98**, 20,737—20,759.
- Christopherson, R. W., 1997: *Geosystems: An Introduction to Physical Geography*, 3rd.ed, pp. 656, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- England, M. N., F. J. Schmidlin, and J. M. Johansson, 1993: Atmospheric moisture measurements: A microwave radiometer-radiosonde comparison. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **31**, 389—398.
- Frate, F. D., and G. Schiavon, 1998: A combined natural orthogonal functions/neural network technique for the radiometric estimation of atmospheric profiles. *Radio Sci.*, **33**, 405—410.
- Gao, B.-C., E. R. Westwater, B. B. Stankov, D. Birkenheuer, and A. R. H. Goetz, 1992 : Comparison of column water vapor measurements using downward-looking near Infrared and Infrared imaging systems and upward-looking microwave radiometers. *J. App. Meteor.*, **31**, 1,193—1,201.
- Han, Y., J. B. Snider, E. R. Westwater, S. H. Melfi, and R. A. Ferrare, 1994: Observations of water vapor by ground-based microwave radiometers and Raman lidar. *J. Geophys. Res.*, **99**, 18,695—18,702.
- , and E. R. Westwater, 1995: Remote sensing of tropospheric water vapor and cloud liquid water by integrated ground-based sensors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 1,050—1,059.
- Hill, G. E., 1991: Comparison of simultaneous airborne and radiometric measurements of supercooled liquid water. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 1,043-1,046.
- Hogg, D. C., F. O. Guiraud, J. B. Snider, M. T. Decker, and E. R. Westwater, 1983: A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere. *J. Appl. Meteor.*, **22**, 789—806.
- Jung, T., E. Ruprecht, and F. Wagner, 1998: Determination of cloud liquid water path over the oceans from Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) data using neural networks. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 832—844.
- Liu, W. T., and F. J. Wentz, 1992: Precipitable water and surface humidity over global ocean Special Sensor Microwave/Imager and European Center for Medium Range Weather Forecasts. *J. Geophys. Res.*, **97**, 2,251—2,264.
- Liou, Yuei-An, and A. W. England, 1996: Annual temperature and radiobrightness signatures for bare soils. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **34**, 981-990.

- _____, and A. W. England, 1998a: A land surface process/radiobrightness model with coupled heat and moisture transport in soil. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **36**, 273-286.
- _____, and A. W. England, 1998b: A land surface process/radiobrightness model with coupled heat and moisture transport for freezing soils. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **38**, 669-677.
- _____, E. J. Kim, and A. W. England, 1998 : Radiobrightness of prairie soil and grassland during dry-down simulations. *Radio Sci.*, **33**, 259-265.
- _____, J. Galantowicz, and A. W. England, 1999a: A land surface process/radiobrightness with coupled heat and moisture transport for prairie grassland. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. (in press)
- _____, Y. C. Tzeng, and K. S. Chen, 1999b: The use of neural networks in radiometric studies of land surface parameters. *Proc. NSC Part A: Physical Science and Engineering*. (in press)
- _____, Y. C. Tzeng, and K. S. Chen, 1999c: A neural network approach to radiometric sensing of land surface parameters. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. (in press)
- _____, and Yu-Tun Teng 1999 : Precipitable water Observed by ground-based GPS receivers. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. (submitted)
- Luers, J. K., and R. E. Eskridge, 1995: Temperature corrections for the VIZ and Vaisala radiosondes. *J. App. Meteor.*, **34**, 1,241—1,253.
- Lyons, W. A., 1997: *The Handy Weather Answer Book*. pp. 115-6, Visible Ink Press, Detroit.
- Nash, J., and F. J. Schmidlin, 1987: WMO international radiosonde comparison, instruments and observing methods. World Meteorological Rep. 30, WMO/TD-No 195, 103 pp.
- Rocken, C., T. Van Hove, J. Johnson, F. Solheim, and R. Ware, 1995: GPS/STORM – GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. **12**, 468—478.
- Schluessel, P., and W. J. Emery, 1990: Atmospheric water vapor over oceans from SSM/I measurements. *Int. J. Remote Sens.*, **11**, 753--766.
- Schroeder, J. A., and E. R. Westwater, 1991: Users' guide to WPL microwave radiative transfer software. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-213, 84 pp.
- Schulz, J., P. Schluessel, and H. Grassl, 1993: Water vapor in the atmospheric boundary layer over oceans from SSM/I measurements. *Int. J. Remote Sens.*, **14**, 2,773—2,789.
- Shea, D. J., S. J. Wifley, I. R. Stern, and T. J. Hoar, 1994: An introduction to atmospheric and oceanographic data. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4044 IA, 132 pp.
- Sheppard, B. E., R. E. Stewart, and G. A. Isaac, 1991: Nonlinear optimal estimation of temperature and integrated water vapor and liquid using a ground-based microwave radiometer in coastal winter storms. *J. Atmos. and Oceanic Technology*, **8**, 812—825.
- Sierk, B., B. Burki, H. Becker-Ross, S. Florek, R. Neubert, L. P. Kruse, and H. Kahle, 1997: Tropospheric water vapor derived from solar spectrometer, radiometer, and GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, **102**, 22,411—22,424.
- Snider, J. B., and D. A. Hazen, 1998: Surface-based radiometric observations of water vapor and cloud liquid in the temperate zone and in the tropics. *Radio Sci.*, **33**, 421—432.
- Solheim, F., 1991: Ground-based microwave radiometric water vapor and liquid water observations,. Radiometrics Technical Report.
- _____, J. R. Godwin, E. R. Westwater, Y. Han, S. J. Keihm, K. Marsh, and R. Ware, 1998a: Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Sci.*, **33**, 393—404.
- _____, 1998b: personal communication via email. Aug. 5, 1998.
- Ulaby, F. T, R. K. Moore, and A. K. Fung, 1981: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Vol. I: Microwave Remote Sensing

- Fundamentals and Radiometry. Artech House Inc, Norwood.
- Ulaby, F. T., R. K. Moore, and A. K. Fung, 1986: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Vol. III: From Theory to Applications. Artech House Inc, Norwood.
- Westwater, E. R., 1978: The accuracy of water vapor and cloud liquid determinations by dual-frequency ground-based microwave radiometry. *Radio Sci.*, **13**, 677—685.
- _____, 1997: Remote sensing of tropospheric temperature and water vapor by integrated observing system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1,991—2,006.
- _____, J. B. Snider, and M. J. Falls, 1990: Ground-based radiometric observations of atmospheric emission and attenuation at 20.6, 31.65, and 90 GHz: A comparison of measurement and theory. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **38**, 1,569—1,580.

Ground-Based Radiometric Sensing of Atmospheric Dynamics in Precipitable Water Vapor

Yuei-An Liou

Center for Space and Remote Sensing Research
And Institute of Space Sciences, National Central University

(Manuscript received 4 June 1998 • in final form 19 April 1999)

ABSTRACT

Utilizing a ground-based, dual-channel water vapor radiometer (WVR), measurements on the integrated precipitable water vapor (PWV) and cloud liquid water (CLW) of the atmosphere were obtained. These two sets of data are used to describe atmospheric dynamics. They were inferred from WVR observations of the brightness temperatures and optical depths at 23.8 and 31.4 GHz collected at the Central Weather Bureau's (CWB) Taipei weather station on March 18–25, 1998. During the field campaign, the WVR was initially installed due east, but was turned north periodically. An elevation mirror was applied to guide the atmospheric emission to the receiver. It is designed to rotate perpendicularly to the WVR itself so that it can be automatically adjusted to scan the atmosphere every 15° at angles between 15° (north/east) and 165° (south/west). WVR observations show that the PWV has a variation from 2.4 cm for clear skies to 6.5 cm for cloudy/rainy conditions at zenith, while the CLW varies from 0 to $7840 \mu\text{m}$ for the corresponding situations. In other words, atmospheric dynamics in PWV and CLW are clearly observable. In addition, PWV and CLW observations at angles from 15° to 165° indicate that the stratified atmosphere becomes a less appropriate assumption with angles departing from zenith.

Key words : Precipitable water vapor, Cloud liquid water, Brightness temperature, Optical depth, Radiometric sensing