



出國報告（出國類別：專題研究）



沙塵暴高空採樣及檢測技術研究



服務機關：行政院環境保護署

姓名職稱：吳權芳薦任技正

派赴國家：美國

出國期間：95年7月1日至9月30日

報告日期：95年10月31日

# 目錄

一、摘要	3
二、目的	4
(一)主題	4
(二)緣起	4
三、過程	6
(一)MODIS 反演大氣產品研究	6
(二)MODIS 衛星資料之處理	7
(三) MODIS 衛星資料反演方程式產品及驗證	7
(四)亞洲氣溶膠觀測實驗(ACE-Asia)期間研究	13
(五)MODIS 近紅外線頻道反演水汽研究	18
(六)衛星對波狀雲之微物理特性反演個案研究	22
(七)3D 輻射效應對於晴空反射及氣溶膠反演	26
(八)第 12 屆雲物理及輻射研討會	27
(九)氣溶膠高空採樣短期訓練	30
四、心得與建議	33
五、附件	

## 表圖目錄

表 1	九十五年度公務人員出國專題研究計畫執行書	36
圖 1	MODIS 資料處理分析示意圖	39
圖 2	MODIS 影像產品分析流程示意圖	39
圖 3	陸地上氣溶膠反演流程圖	40
圖 4	1 月、4 月、7 月、10 月陸地上細粒徑氣溶膠百分比	40
圖 5	南非東岸 0.55 $\mu\text{m}$ 氣溶膠光學厚度反演比較	41
圖 6	洋面上氣溶膠反演流程圖	41
圖 7	全球地面氣溶膠監測網	42
圖 8	MODIS 全球的氣溶膠反演	42
圖 9	東亞地區氣溶膠季節性分布	43
圖 10	洋面上 MODIS 與 AATS 比對	43

## 沙塵暴高空採樣及檢測技術研究

### 一、摘要

隨著科技的日新月異，目前對於沙塵暴的高空採樣及檢測技術，除過去利用儀器進行點的短期採樣監測，再送回實驗室進行微粒的特性分析，包括粒徑、成分、生物特性、病毒特性進行研究外，現有衛星上感測器(例如中解析度影像光譜儀，MODIS)的輻射反演分析技術已經可以觀測及反演大範圍的沙塵暴氣溶膠特性，大幅增加傳統方法的時間及空間特性能量，由於這項新的觀測技術係利用遙測的方法，因此在科學的研究上，大量進行反演方程式的改進；利用密集觀測實驗計畫，以衛星觀測結果與地面儀器測量及飛機、船舶的觀測進行比對驗證，持續提昇衛星遙測技術的準確度。

本署自 2004 年開始，與中央氣象局進行跨機關合作，將其接收的 Terra、Aqua 衛星上 MODIS 資料送到本署監測中心，進行沙塵暴追蹤預報及空氣污染的解析等作業，初步已利用其資料反演 MODIS 一、二級產品，包括氣溶膠光學厚度(AOD)、火點機率分布、全彩影像(RGB)、雲貌、總臭氧量等。本次出國專題研究(表 1)，進行沙塵暴氣溶膠受三維積雲效應輻射交互影響、亞洲氣溶膠觀測實驗(ACE-Asia)期間研究，未來可以協助本署提昇東亞沙塵暴的觀測與預報作業、衛星遙測技術的應用等。

## 二、目的

### (一)主題

現行運轉的兩套 MODIS 分別於 1999 年 12 月 18 日及 2002 年 5 月 4 日分別裝載於 Terra、Aqua 衛星上，該衛星由美國太空總署(NASA)設計發射，提供高空間、時間解析度資料，來觀測地球的變化。本次出國專題研究，係於美國太空總署(NASA)的戈達太空中心(GSFC)進行，該中心對 MODIS 的輻射反演研究最為先進，研究期間與 Marshak 和 Wen 博士使用衛星 MODIS 觀測資料進行沙塵暴氣溶膠受三維積雲效應輻射交互影響研究，同時與 Chu 博士利用 MODIS 來進行亞洲氣溶膠觀測實驗(ACE-Asia)期間研究。

目前在地球生物圈中最重要的議題莫過於氣候變遷，其變化的原因主要來自於大氣中對流層氣溶膠(包括沙塵暴、海鹽、生質燃燒、工業及都會區人為污染)所產生的輻射傳遞、微量氣體、雲量、雲狀及太陽輻射等，為了發展傳統及預測之全球氣候模式，因此有必要監測上述引發輻射傳遞之因子。

兩套 MODIS 感測器分別裝載於 Terra、Aqua 衛星上，目前 MODIS 大氣研究科學團隊正在發展有關雲、氣溶膠特性及分布之遙測理論程式，解析這些衛星遙測數據。這些產品同時與研究土地、海洋或其它感測器(例如 CERES and MISR)之科學團隊共同使用，最終，這些產品將被整合在這些地球科學團隊成果，致力於全球氣候模式之發展應用。

### (二)緣起

過去 20 年來，大多數的研究主要致力於非洲撒哈拉沙漠對地球輻射收支平衡、大氣化學及生物圈循環的效應，而亞洲沙塵的部分並沒有受到太多的重視，根據東亞沙塵暴 40 年的觀測資料，在沙塵源區全年都有可能發生沙塵暴，但春季是沙塵暴發生頻率最高且強度最嚴重的季節，目前研究課題，主要關注在沙塵的組成特性，因為沙塵中除了懸浮微粒外，還有其它的氣溶膠，包括氮氧化物及二氧化硫等氣體。因此國際間重視此一議題的國家，研究規劃亞洲氣溶膠觀測實驗，於 2001 年 3 月至 5 月執行，以進行東亞及西北太平洋地區氣溶膠物理、化學特性分析及輻射效應影響等科學研究。

東亞沙塵暴主要起源於塔克拉馬干沙漠及戈壁沙漠，配合溫帶氣旋及蒙古高壓的天氣系統，產生強烈的氣壓梯度。沙塵揚起後，可以隨著高空氣流向東傳送，甚至可以傳送到美洲大陸。近年來，中國的北方、西北地區，由於乾旱及沙漠化的影響，沙塵暴發生的頻率、強度都有增加的趨勢，此外，因農耕、放牧等開墾大面積的土地，造成每年增加8億噸的沙源。在2001年春季，中國北方沙塵源區合計發生3個強烈沙塵暴、10個中等沙塵暴及5個較弱的沙塵暴，合計有41天受到沙塵侵襲。東亞地區的沙塵不像非洲撒哈拉沙漠，只有沙粒，還包括都會區及工業區污染等，因而改變沙塵原來的組成及特性。另外來自東南亞地區因農業開墾所產生的生質燃燒，其污染也會影響到大氣，這些煙霧會隨著西南氣流傳送到西太平洋或甚至更遠的下風地區，Jaffe在1999年春季美國西岸的觀測研究，這些氣溶膠會提升當地一氧化碳10%；懸浮微粒(PM<sub>10</sub>)50%及過氧乙醯硝酸(PAN, Peroxyacetyl nitrate)100%。

因此利用衛星遙測資料來探討全球氣溶膠的季節及區域特性變的很重要，由於全天候及全面性的觀測，因此可以藉此瞭解氣溶膠的不均勻分布情形。利用繞極軌道衛星的高空間解析度及同步衛星的高時間解析度，也可以解決短期幾天到一星期間的氣溶膠分布特性。

### 三、過程

本次出國專題研究計畫期間自 2006 年 7 月 1 日至 9 月 30 日，主要赴美國太空總署戈達太空中心進行沙塵暴高空氣溶膠(aerosol)分析技術研究，期間於 7 月 10 日至 14 日參加美國氣象學會(AMS)舉辦之第 12 屆雲物理及輻射研討會(workshop)，進行有關衛星遙測氣溶膠沙塵暴高空採樣及檢測技術相關主題研討。7 月 24 日至 8 月 4 日參加美國 HOWARD 大學辦理之氣溶膠高空採樣短期訓練。

本研究工作進行的項目分別為：MODIS 反演大氣產品研究、MODIS 衛星資料之處理、MODIS 衛星資料反演方程式、產品及驗證、亞洲氣溶膠觀測實驗(ACE-Asia)期間研究、MODIS 近紅外線頻道反演水汽研究、衛星對波狀雲之微物理特性反演個案研究、3D 輻射效應對於晴空反射及氣溶膠反演研究、第 12 屆雲物理及輻射研討會(workshop)、氣溶膠高空採樣短期訓練，以下分述之：

#### (一) MODIS 反演大氣產品研究

MODIS 大氣產品來自 Terra 和 Aqua 衛星，每種產品都被賦予 8 個位元之名字(ESDT)，這些產品內容說明如下：

1. 氣溶膠產品包括氣溶膠種類、光學厚度、微粒大小分布、質量濃度、光學特性及輻射傳遞，其名字為 MOD04\_L2 (Terra) 和 MYD04\_L2 (Aqua)。MOD04 是氣溶膠的 2 級數據產品(level2)，其中包含 64 個參數，MOD08 是氣溶膠的 3 級數據產品，其中參數包括雲及水汽，其解析度是 1 緯度×1 經度，時間解析度可分為每日(MOD08\_D3)、每 8 日(MOD08\_E3)及每月(MOD08\_M3)。Level2 產品中的 64 個參數中，其中 9 個為地理位置資料；3 個為陸地及海洋連接資料，23 個為陸地資料；29 為海洋資料。
2. 水汽產品包括大氣中水汽及降雨等，其名字為 MOD05\_L2 (Terra) 和 MYD05\_L2 (Aqua)。
3. 雲產品包括雲中微粒狀態(固相冰和液相水、雲和雪)、雲中微粒之粒徑、雲光學厚度、雲陰影效應、雲頂溫度、雲頂高度、雲散射、雲的透射率、白天和夜晚雲的碎片等因素所造成之雲物理及輻射特性差異，其名字為 MOD06\_L2 (Terra) and MYD06\_L2 (Aqua)。
4. 大氣垂直剖面產品包括大氣中的溫濕度、大氣穩定度、總臭氧

量，其名字為 MOD07\_L2 (Terra) and MYD07\_L2 (Aqua)。

5. 雲貌產品包括觀測未被雲或雲的陰影遮掩的地表，透過雲貌可以觀測到卷雲、冰/雪、陽光強度，同時可以標註區分為白天/夜晚、陸地/水面，其名字為 MOD35\_L2 (Terra) and MYD35\_L2 (Aqua)。
6. 其餘大氣第二級產品包括氣溶膠、水汽、雲、大氣垂直剖面、雲貌等，這些產品必須設計可供儲存、傳輸等需求，以利做為 MODIS 資料科學研究使用，其空間解析度分別為 5 公里及 10 公里(NADIR)，其名字為 MODATML2 (Terra) 和 MYDATML2 (Aqua)。

## (二) MODIS 衛星資料之處理

1. NASA DAAC 為強化 MODIS 資料之解析與應用，乃就已發展成熟之 SeaDAS 軟體加以修正，NCOR 遙測實驗室在 SeaSPACE 公司之協助下業已建構 MODIS 分析技術軟體流程圖(圖 1)。使用者可利用接收站或網路擷取出 raw level 中之 L1a、L1b (依其不同波段的特性而有 1 公里、500 公尺及 250 公尺不同的取樣特性與解析度) 及衛星資料的地理位置等影像資料，透過適當的演算法，擷取使用者所需且有效的資料。其中網路資料傳輸方式是較經濟的方法，使用者只要向 NASA-DAAC 取得資料授權申請，則可透過網路取得 MOD01、MOD02 與 MOD03 等資料，不過使用者需等 NASA-DAAC 協助擷取後，才可下載；所以此一方式雖然經濟，但需要一些時間(約 3 天左右)處理。至於接收站部份，則需要自己建置接收及處理系統，經費高；維護亦需較多的人力與資源。
2. 使用者可透過 NASA 資料申請，取得 MOD01~03 的三種不同解析度的資料，再依圖 2SeaSPACE 公司整合 IMAPP-MODIS 資料處理與影像產品流程，將不同遙測波段之修正參數導入系統中，透過不同的演算法，(1)濾雲技術之模式(Cloud Mask MOD35)，透過陰影，冰/雪及太陽耀斑區(sun-glint)的信息，建立雲區遮罩(Cloud mask)；(2)表面水溫(MOD 28)，利用黑體輻射原理，建立表面水溫資料及影像；(3)海洋水色(MOD 18)等模組進行海洋產品的解析。

## (三) MODIS 衛星資料反演方程式及驗證

MODIS 是美國太空總署(NASA)發射 Terra 和 Aqua 衛星上其中一個



感測器，稱為中解析度影像光譜儀，每日利用 0.41-15 $\mu\text{m}$  的波段對地球進行全面性的觀測，可以針對陸地及海洋進行氣溶膠的光學特性分析。在陸地上，需利用 3 個頻道反演氣溶膠光學厚度、氣溶膠細粒徑百分比及大氣層頂的反射太陽光譜通量。在洋面上，氣溶膠光學厚度的反演需要利用到 7 個頻道(0.47-2.13 $\mu\text{m}$ )，也可以反演定量的氣溶膠細粒徑百分比及有效粒徑。另外洋面上還可以計算出由氣溶膠、微粒及雲中凝結核的散射等，利用 2 年的 AERONET 中 132 個測站與 MODIS 在洋面上氣溶膠光學厚度、有效粒徑進行比對，在洋面上氣溶膠光學厚度的差異為 $\Delta\tau=\pm 0.03 \pm 0.05\tau$ ，在陸地上氣溶膠光學厚度的差異為 $\Delta\tau=\pm 0.05 \pm 0.15\tau$ 。利用島嶼測站上的輻射觀測與 MODIS 在洋面上的反演比較，有效粒徑偏差為 $\Delta r_{\text{eff}}=0.11\mu\text{m}$ 。這樣 MODIS 反演出來的結果，提供氣溶膠輻射效應，有助對全球氣候影響的瞭解。

MODIS 氣溶膠反演方程式分為兩個部分，一個適用於陸地，一個適用於海洋，這些方程式在衛星發射前，1997 年 Kaufman et al. 和 Tanre et al. 即已提出初步的理論方程式，2003 年 Levy et al. 提出一個更完整的洋面上氣溶膠反演方程式，不管是陸地上或洋面上的氣溶膠反演方程式，都必須要進行校驗。在可見光及中紅外線頻道的反射率不確性低於 2%，因此由 MOD/MYD35 的雲遮蔽資料，可以知道每一個解析點是在陸地上或水面上。這些方程式雖然有不斷做過一些修正(Collection 003、004、005)，但原來的理論架構是不變的。

## 1. 陸地上氣溶膠反演方程式

圖 3 為陸地上氣溶膠反演方程式的流程作業，MODIS 1b 的資料包括檢驗過的輻射及反射資料，這些資料都經過水汽、臭氧、二氧化碳的修正後，才能進入反演方程式的流程作業。首先整理 0.47、0.66 及 2.13 $\mu\text{m}$  頻道的資料，再分成每 10 公里 $\times$ 10 公里的網格，網格內有 400 個解析點，解析度為 500m，0.66 $\mu\text{m}$  的解析度雖然有 250m，但為配合其它兩個頻道，所以仍要簡化為 500m。

### (1) 解析點的選取

每個網格內的 400 個解析點，都要定義為雲、冰、雪、水等，若解析點被定義為前述的狀態，即會排除在反演方程式之外。基本 MOD/MYD35 的雲遮蔽資料即可以提供上述這些訊息，另外還可以知道低雲或由 1.38 $\mu\text{m}$  反射率得知的高雲。由於方程式對

於每個解析點的地表資料很敏感，因此連續 8 個解析點的雲遮蔽資料一致，MOD/MYD35 才會有明確定義。另外植被指數 (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) 的計算，若  $NDVI < 0.10$ ，表示為含水的雲遮蔽資料，如同雲量、雪會被排除。

## (2) 地面反射率的計算

這個程序是由 1997 年 Kaufman et al. 提出，由於地面亮度會影響方程式的反演，因此利用  $2.13\mu\text{m}$  的反射率來決定每一個解析點的亮度，有用的解析點反射率數值需介於 0.01 到 0.25，另外，在  $0.66\mu\text{m}$  的可見光頻道，20% 最暗及 50% 最亮的資料需被排除，最暗解析度被排除原因為避免雲的陰影及特殊地表的影響，最亮解析度被排除原因為受雲及特殊地表的影響。一般而言雲的影響較雲陰影區常出現，因此最暗排除的百分比，較最亮解析度少。最後每個網格內僅剩 30% 的解析點，但至少需超過 12 個解析點，再計算  $0.47$ 、 $0.66$  及  $2.13\mu\text{m}$  頻道的網格的平均反射率，一般經驗方程式  $\rho_{0.47} = 0.25\rho_{2.13}$ ； $\rho_{0.66} = 0.50\rho_{2.13}$ 。

## (3) 選擇氣溶膠模組

計算出來的  $0.47$  及  $0.66\mu\text{m}$  的地表反射率及大氣層頂平均反射率，利用查詢對照表 (LUT, Look Up Table) 反演這兩個頻道的氣溶膠光學厚度，接下來再利用單一散射反照率及相位函數來計算輻射強度，輻射強度在沙塵影響 (主要為粗粒徑) 及非沙塵影響 (主要為細粒徑) 有明顯區別。再利用兩個頻道的比值 ( $\rho_{0.66}/\rho_{0.47}$ ) 來決定是沙塵、非沙塵及混合區。

$(\rho_{0.66}/\rho_{0.47}) < 0.72$  屬非沙塵區

$(\rho_{0.66}/\rho_{0.47}) > 0.9 - 0.01(\theta - 150)$  屬沙塵區

$0.72 \leq (\rho_{0.66}/\rho_{0.47}) \leq 0.9 - 0.01(\theta - 150)$  為混合區

$\theta$  為散射角 (150–168)

然後還可以再計算出細粒徑的百分比，其準確度取決於選取的氣溶膠模組及地面反射率。圖 4 是 1 月、4 月、7 月、10 月陸地上細粒徑氣溶膠百分比。

一般而言，混合區的條件很少發生，另外要注意的是非沙塵區並非氣溶膠完成都是細粒徑，也有粗粒徑，只是比率比較低而已。

#### (4) 氣溶膠光學厚度計算

在沙塵和非沙塵的個案中，利用地面反射率和大氣層頂的反射率資料，對照查詢表來反演氣溶膠光學厚度等大氣參數，利用 0.47 及 0.66 $\mu\text{m}$  的反演資料再求取 0.55 $\mu\text{m}$  地面反射率，作為全球氣候模式的輸入資料。

#### (5) 地表亮度太高的另一種反演方程式

如果地表的亮度太高，每個網格內的 400 個解析點，不足 12 個有效解析點時，2.13 $\mu\text{m}$  的反射率可以隨光學路徑調整，直到上邊界等於 0.40。再者，由於 0.47 $\mu\text{m}$  大氣反射訊號最強，地表最暗，因此利用此一波段再進行網格雲遮蔽資料分析，若超過 12 個有效解析點時，可以進行氣溶膠光學厚度的反演，若仍不足 12 個有效解析點時，則放棄無法進行反演。但是這種方法較前述的反演方法不準確，資料品質較低，而且無法區分沙塵區及非沙塵區。圖 5 為南非東岸地區，上圖為利用第一種方法反演的氣溶膠光學厚度，若再加入第二種方法的反演，有效解析點可以增加 7060 到 17849 點。

## 2. 洋面上氣溶膠反演方程式

圖 6 為洋面上氣溶膠反演流程，1997 年 Tanre. et. al. 即已提出，後來再陸續改進沙塵區的反演、陽光鏡面耀斑區及更新查詢對照表。在反演流程的第一步，計算 10 公里 $\times$ 10 公里網格解析點 6 個波段(0.55 $\mu\text{m}$ , 0.66 $\mu\text{m}$ , 0.86 $\mu\text{m}$ , 1.24 $\mu\text{m}$ , 1.6 $\mu\text{m}$ , 2.13 $\mu\text{m}$  的反射率，再利用 MOD/MYD35 雲遮蔽資料處理網格解析點，一般而言，岸邊淺水及包括些微陸地的影響，其反演資料品質也會比較不好。

### (1) 雲遮蔽資料

若 400 個網格解析點都在水面上，就很難區分好的解析點或有雲的解析點，一般利用可見光的頻道來處理 MOD/MYD35 的雲遮蔽資料，在洋面上可能會將沙塵個案誤認為雲的反射，而誤判不去進行反演，另外利用紅外線頻道判別低高度的暖雲，可能

誤判為無雲區，納入氣溶膠方程式反演，進行計算。因此在洋面上的氣溶膠方程，利用每  $3 \times 3$  的網格點，計算  $0.55\mu\text{m}$  反射率的標準差，若這 9 個解析點的標準差超過 0.0025，即定義為雲區，9 個解析點均捨棄，唯一的例外是沙塵個案，這樣的事件也會有不均勻的反射率出現。

沙塵個案可以利用  $0.47$  及  $0.66\mu\text{m}$  的比值判斷，若  $(\rho_{0.47}/\rho_{0.66}) < 0.75$ ，這 9 個解析點即判斷受嚴重沙塵影響，因此可以利用氣溶膠方程式進行反演，這種標準訂的比較高主要怕將雲誤判為沙塵，若放寬標準，可能可以將較弱的沙塵進行反演，但也可能有雲，造成反演的誤差。以上利用空間的差異辨認法，有時在厚雲且伴隨卷雲時，因空間差異不大而無法辨認，這種厚雲在可見光頻道亮度非常高，因此另外利用  $0.47\mu\text{m}$  反射率  $> 0.4$  可以作為判斷的依據。1998 年 Ackerman et al. 提出卷雲可以利用紅外線及非紅外線的測試辨認，共有三道測試，分別為紅外線卷雲測試、 $6.7\mu\text{m}$  測試及紅外線差異測試，如果其中一道測試認定為有雲，即認定為有雲，上述的波段為  $1.38\mu\text{m}$  及  $(\rho_{1.38}/\rho_{1.24})$ 。若  $QC(\text{品質值})=0$ ，仍可以用到第二層的產品，第三層產品如長期氣溶膠氣候統計，則無法使用，只有在  $QC > 0$  可以使用。

最後進行沈積的雲遮蔽判斷，主要辨認岸邊出海口的沈積，並將之去除，這種辨認可以利用大於  $1\mu\text{m}$  的波長在水面上有強吸收區進行。經過雲遮蔽測試及沈積的雲遮蔽測試的解析點，利用  $0.86\mu\text{m}$  反射率的大小進行排序，將最高及最暗的 25% 捨去，包括雲區、雲陰影區及其它特殊情況，可以保留 50% 的有效解析點，一般而言，海面上的雲遮蔽測試較陸地上準確，因此有效解析點可以較少，在 400 網格解析點中至少要有 10 個有效解析點，分別計算 6 個頻道的平均反射率及標準差。

## (2) 海面上陽光鏡面耀斑區

首先利用太陽天頂角、衛星天頂角及兩者相對角度計算海面上陽光鏡面耀斑角度，一般在海面上的氣溶膠反演都會排除鏡面耀斑區，因此在角度大於  $40^\circ$ ，即可進行反演。

## (3) 反向程序

這個反向程序由 1997 年 Tanre et al. 及 2003 年 Levy et al.

提出，利用包括 4 個細粒徑及 5 個粗粒徑的查詢對照表，這個程序需要同時用到兩種粒徑的資料，因此有 20 種的不同組合計算，取 0.55 $\mu\text{m}$  最小的光學厚度、細粒徑百分比最小誤差( $\varepsilon$ )，反向程序計算即利用 $\varepsilon < 3\%$ 組合的結果平均，若沒有 $\varepsilon < 3\%$ ，即找最接近 3%的 3 個組合的結果平均，計算出來的結果即可以反演相關的氣溶膠參數，包括光學厚度、細粒徑百分比、有效粒徑及質量濃度等。

#### (4) 誤差

1997 年 Tanre et al. 探討氣溶膠反射率的反演誤差，發現 1% 的校正誤差並不會對光學厚度造成影響，但對粒徑大小的影響較大，在 0.55 $\mu\text{m}$  的細粒徑百分比等於 1 時，會有 $\pm 0.25$ 的不確定度；在細粒徑百分比=0 時會有 $\pm 0.5$ 的不確定度。在 0.4 $\mu\text{m}$  粒徑以下的氣溶膠，反演的粒徑大小誤差在 $\pm 0.10\mu\text{m}$ ，但對 1 $\mu\text{m}$  粒徑以上的氣溶膠，反演的粒徑大小會嚴重低估。目前已經有相當多的研究進行相關的敏感度測試及查詢對照表的改進。

#### (5) 最後檢查程序

在最後反演結果出來之前，會有相關的程序進行檢查，一般而言，0.55 $\mu\text{m}$  的光學厚度介於-0.01 到 5 之間都是可以接受的，在很小的負值也是可以接受的，通常發生在乾淨的洋面上，低氣溶膠光學厚度時，資料品質較低。

#### (6) 特殊案例：高沙塵區出現在陽光鏡面耀斑區( $\theta < 40$ 度)

由於高沙塵在藍色波段(0.55 $\mu\text{m}$ )吸收很強，與陽光鏡面耀斑區會混淆，因此利用 $(\rho_{0.47}/\rho_{0.66}) < 0.95$  確認高沙塵區，但通常在陽光鏡面耀斑區的條件下，資料品質為定義為 0，MODIS 3 級數據產品(level 3)反演時不能納入使用。

### 3. 氣溶膠產品的比對驗證

一般衛星反演資料的驗證主要與全球地面氣溶膠監測網(AERONET，全球共 132 個測站，如圖 7)中的太陽輻射計地面觀測進行比對，AERONET 中儀器使用頻道包括 0.38、0.44、0.50、0.67、0.87 及 1.02 $\mu\text{m}$ ，可以反演氣柱內的氣溶膠有效粒徑，目前兩者比較時，係利用 AERONET 中 1.5 級數據產品(尚未完成

QC)，主要 2.0 級數據產品反演要等到數個月後才可以完成。有關衛星反演資料與 AERONET 的反演資料比對，主要為光學厚度及有效粒徑，目前初步的比對結果，兩者光學厚度差異在陸地上  $\pm 0.05 \pm 0.15\tau$ ；洋面上  $\pm 0.03 \pm 0.05\tau$ ；洋面上有效粒徑的差異為  $\pm 25\%$ 。

### (1) 光學厚度的比對驗證

利用相同或接近頻道的衛星反演資料與 AERONET 的反演資料進行比對，在陸地  $0.55\mu\text{m}$  波段的平均光學厚度為 0.18，兩者的比較偏差為 41%，另外在加拿大或阿拉斯加等低光學厚度區的反演結果也會比較不好，誤差百分比較大。一般而言，在洋面上反演的結果較陸地上的好，因此在洋面的反演結果可以用來發展氣溶膠的全球氣候模式，用以估計其對氣候的影響。

### (2) 氣溶膠粒徑的驗證

氣溶膠粒徑的反演較光學厚度複雜，誤差也相對較大，對儀器的校正也很敏感，與光學厚度的結果一樣，洋面上反演的結果較陸地上的好。另外過去在比對衛星與 AERONET 的反演資料，都假設氣溶膠是球面的微粒，因此常在沙塵暴發生時，氣溶膠的性質改變，變成非球面，粒徑大小也會被低估。目前 MODIS 的反演方程式已有改進，不再需要假設氣溶膠的形狀，已發展出經驗相位函數。

### (3) 驗證結果

圖 8 為 MODIS 全球的氣溶膠反演，主要利用 MODIS 的輻射資料反演產生的光學厚度及粒徑參數建構而成，圖中紅色區域代表小粒徑 ( $< 0.5\mu\text{m}$ ) 氣溶膠區，綠色區域為大粒徑區，從圖中可以清楚發現在海鹽、沙漠的沙塵等自然源地區，其主要為大粒徑的氣溶膠區，人為活動所造成的農業開墾、焚林、都會區及工業污染等，主要為小粒徑的氣溶膠區，因此利用 MODIS 氣溶膠粒徑資料可以輕易區分氣溶膠主要來自自然源或人為污染。未來可以利用進一步的精確估算人類活動所造成的氣溶膠對氣候的影響效應。

### (四) 亞洲氣溶膠觀測實驗(ACE-Asia)期間研究

在 ACE-Asia 期間，利用 MODIS 解析洋面上氣溶膠特性，該實驗進

行於 2001 年 3 月至 5 月，實驗地點在西北太平洋地區，實驗目的為瞭解春季沙塵暴引發傳送之沙塵、煙霧、都會區及工業區污染、海洋背景氣溶膠等特性分析。MODIS 提供一個大區域範圍觀測的結果，我們把重點放在洋面上的氣溶膠反演，一般而言，在北緯 30 到 50 度區域，當沙塵暴發生時，在 0.55 $\mu\text{m}$  波段氣溶膠光學厚度 ( $\tau_a$ ) 最高，在此一區域 0.4-0.7 $\mu\text{m}$  的背景月平均值變化差異很大，顯示季節性受到沙塵的影響很大。在氣溶膠粒徑部分，月平均的變化從背景乾淨地區細粒徑百分比為 0.47 及粒徑 0.75 $\mu\text{m}$ ，到污染的生質燃燒地區細粒徑百分比為 0.85 及粒徑 0.3 $\mu\text{m}$ 。

在 ACE-Asia 期間，結合衛星 MODIS 資料、探空、船舶及地面相關輻射觀測進行比對，一般的氣溶膠光學厚度差異為  $\pm 0.03 \pm 0.05\tau_a$ ，但在沙塵暴期間，MODIS 資料對氣溶膠光學厚度會比地面觀測資料高出甚多，這種現象與沙塵粒子的非球面粒狀有很大的關係。比對沙塵影響期間，MODIS 與全球地面氣溶膠監測網 (AERONET) 的資料，前者在沙塵氣溶膠粒徑低估約 0.2 $\mu\text{m}$ ，在分析 MODIS 2001 年到 2003 年資料的敏感度測試，一般氣溶膠粒徑差異都在可接受的範圍，惟有在沙塵暴期間及海鹽部分，氣溶膠粒徑的差異就會很大。

#### 1. 在海面上 MODIS 衛星資料對氣溶膠反演及準確度

MODIS 衛星資料對陸地及海洋上氣溶膠反演有不同的方程式，以下我們僅針對海面上 MODIS 衛星資料對氣溶膠反演進行討論，這個方程式利用 MODIS 6 個 500 公尺解析度的波段 (0.55、0.67、0.86、1.24、1.64 及 2.1  $\mu\text{m}$ )，來反演 10 公里 $\times$ 10 公里網格，無雲及非陽光耀斑反射區 (glint angle 大於 40 度) 的氣溶膠光學厚度、細粒徑百分比及有效粒徑等，以下利用 3 個步驟來說明洋面上氣溶膠的反演：

- (1) 首先進行濾雲，包括空間變化測試 (0.55  $\mu\text{m}$ )、亮溫測試 (6.7、11 及 12  $\mu\text{m}$ )、1.38 及 0.66  $\mu\text{m}$  反射係數測試、1.38/1.24  $\mu\text{m}$  反射係數比測試等。
- (2) 排除高且薄的卷雲。
- (3) 利用雲貌去除有干擾因素的網格，並將去除後的網格 (無雲及非陰影區) 進行排序，再將 25% 最暗及最亮網格點去除，稱為網格最小殘餘法 (least residual method)，反演出來的氣溶

膠主要參數包括：光學厚度、細粒徑粒子百分比及有效粒徑等，其次還可以利用查詢對照表(Look Up Table)計算反射/入射通量、雲凝結核、氣柱質量濃度等。

在 7 組頻道反演的氣溶膠厚度中，只有 0.66 及 0.87  $\mu\text{m}$  的結果可以與 AERONET 中太陽輻射計的資料進行比對，在近年來(2003 至 2005 年)驗證方法中，氣溶膠光學厚度差異為 $\pm 0.03 \pm 0.05\tau_a$ ，標準差為 0.02，是美國海洋大氣總署(NOAA)發射衛星感測器 AVHRR 的一半。在微粒粒徑的結果，MODIS 與 AERONET 比較，氣溶膠光學厚度大於 0.15 個案中，其 70%的粒徑差異小於 0.1  $\mu\text{m}$ ，較大的誤差出現在光學厚度小於 0.15 的個案，主要原因為方程式與感應器的不確定度。另外在沙塵的個案研究中指出，由於氣溶膠非球面效應，會高估光學厚度，而低估氣溶膠的粒徑。

## 2. MODIS 氣溶膠光學厚度與氣象場的分析

由於東亞地區沙塵暴效應及東南亞地區生質燃燒的影響，可以發現北半球的春季(圖 9)，氣溶膠厚度有逐漸上升的趨勢，而且可以發現中國東岸、北部及南部，受都會區及工業區的污染，全年氣溶膠都維持很高。在春季的 4 月平均( $0.45 \pm 0.40$ )是氣溶膠厚度最高的月分，其中沙塵暴是主要的貢獻成因之一，其次是 3 月( $0.40 \pm 0.33$ )及 5 月( $0.40 \pm 0.40$ )。根據 40 年的沙塵地面觀測站資料，可以彙整出 3 個沙塵傳輸路徑的緯度帶，分別為 (1) 北緯 40-70，占 7%，(2) 北緯 30-40，占 60% (3) 北緯 0 - 30，占 33%。2001 年 3 月至 5 月 850 及 700 百帕的平均風場，其中 3 月及 4 月風的強度高於 5 月，2002 年 Chou 指出，大氣循環對洋面上的氣溶膠分布有很大的影響，由 MODIS 反演的氣溶膠厚度，其中 3 月最高值區域出現在北緯 30 - 40，為 0.48；4 月在北緯 40 - 50，為 0.51，與西風帶的最大風速區一致。

為瞭解氣溶膠與污染源的空間分布，接下來在 ACE-Asia 實驗觀測區域(北緯 10 - 60 及東經 100 - 160)劃分成每  $10 \times 10$  度的小區域網格，並分別計算 2001 年 3 月至 5 月之光學厚度、細粒徑百分比及有效粒徑的月平均、標準差及中位數，可以發現離陸地愈遠，光學厚度愈小，由區域的分布，可以發現受沙塵暴的影響區域(1, 2, 3, 4, 6, 7)，光學厚度平均值高( $>0.3$ )；工業污染區域(10, 11)、生質燃燒區域(15)，其標準差偏大，主要在沙塵或生質燃燒事件會造成非常高的氣溶膠的情形，每月的月平均與中位數也會相差很大，例如 2001 年 4 月光學厚度月平均為 0.4，而 3



月及 5 月只有 0.2 而已，一般而言，30 度以北為主要受沙塵暴影響區域，30 度以南為東南亞生質燃燒影響區域。

在細粒徑百分比的區域變化，緯度愈低其範圍也會愈大，其中北緯 50 - 60N 為 0.70 - 0.85；北緯 30 - 50 為 0.65 - 0.8；北緯 20 - 30 為 0.55 - 0.85；北緯 10 - 20 為 0.45 - 0.85，主要受海鹽影響，氣溶膠也會愈大。但細粒徑百分比的變化( $\leq 0.05$ )，在月份及區域均不像光學厚度的變化大。在有效粒徑的部分，月平均值多介於 0-1 $\mu\text{m}$  之間，標準差介於 0.1-0.25 $\mu\text{m}$ ，而其月分及區域的變化與細粒徑百分比一樣變化不大( $< 0.05$ -0.1 $\mu\text{m}$ )，其中北緯 50 - 60 為 0.25 - 0.35  $\mu\text{m}$ ；北緯 40 - 50 為 0.35 - 0.45  $\mu\text{m}$ ；北緯 30 - 40 為 0.4 - 0.45  $\mu\text{m}$ ；北緯 20 - 30 為 0.35 - 0.55  $\mu\text{m}$ ；北緯 10 - 20 為 0.3 - 0.75  $\mu\text{m}$ 。

### 3. 氣溶膠光學厚度

在 ACE-Asia 期間，飛機上及船舶上的太陽輻射計提供洋面上寶貴的氣溶膠資料，以下提供各太陽輻射計及多濾旋轉波段輻射計的驗證結果。

(1) MODIS 與在 C-130、Twin-Otter 飛機上的太陽輻射計(AATS；Ames Airborne Tracking Sunphotometer)



AATS-6 的 6 個波段分別為 0.380、0.451、0.525、0.864、0.941 及 1.021  $\mu\text{m}$ ，裝載在 C-130 飛機上，AATS-14 的 14 個波段分別為 0.354、0.38、0.449、0.454、0.500、0.525、0.606、0.675、0.779、0.864、0.940、1.019、1.240 及 1.558  $\mu\text{m}$ ，裝載在 Twin-Otter 飛機上，提供氣溶膠的量測，可以與 MODIS 反演的氣溶膠光學厚度進行比對。在飛機上的太陽輻射計，基本上與地面觀測的儀器大致相同，只是在飛機上會有更複



雜、更敏感的追蹤太陽的設計，尤其在 AAT-14 波段中大於  $1\mu\text{m}$  的資料更加寶貴，因為平時很少有這樣的量測。當以飛機上觀測之氣溶膠光學厚度與衛星進行比對，飛機的高度是一個很重要的問題，基本上高度愈低，其量測的氣溶膠光學厚度愈能代表整個氣柱，本小節以 50 公尺以下高度的觀測資料進行比對，在 50 公尺， $0.55\mu\text{m}$  波段氣溶膠光學厚度的量測誤差約在 0.015，與 MODIS 的反演誤差 1% 接近。本次選取 11 個個案，飛機飛行高度低於 50m，圖 10 為洋面上 MODIS 與 AATS 的結果進行比對，比測的結果相當一致（均方根誤差  $\text{SRMSE} < 0.05$ ），只有個案 2 的 0.11 及個案 4 的 0.3 偏高，從這兩個個案可以歸納出沙塵的存在及沙塵微粒的非球面效應，造成 MODIS 反演氣溶膠光學厚度偏高。若改以橢圓球體的方程式進行反演，兩者的比較結果會比較好。在個案 1、5、8 中，它們的  $\text{SRMSE} < 0.04$ ，MODIS 反演的氣溶膠光學厚度在波長  $< 1\mu\text{m}$  時會偏高，反之偏低。

## (2) MODIS 與 R//V Ronald Brown 船上輻射計的比對

在 ACE-Asia 實驗期間，R//V Ronald Brown 行駛於西太平洋進行觀測，MTPS 輻射計有 5 個波段 ( $0.38$ 、 $0.44$ 、 $0.50$ 、 $0.675$ 、 $0.87\ \mu\text{m}$ )，觀測角度為  $2.5$  度，為人力手動操作。Simbad 輻射計有 5 個波段 ( $0.443$ 、 $0.49$ 、 $0.565$ 、 $0.67$ 、 $0.87\ \mu\text{m}$ )；SimbadA 輻射計有 10 個波段 ( $0.35$ 、 $0.38$ 、 $0.412$ 、 $0.443$ 、 $0.49$ 、 $0.51$ 、 $0.56$ 、 $0.62$ 、 $0.67$  及  $0.75\ \mu\text{m}$ )，可以進行大氣中氣溶膠光學厚度的觀測，同樣屬人力手動操作。MFRSR 輻射計有 6 個窄波段 ( $0.415$ 、 $0.499$ 、 $0.614$ 、 $0.67$ 、 $0.868$  及  $0.936\ \mu\text{m}$ ) 及 1 個寬波段進行觀測，可以涵蓋整個太陽光的光譜，每 30 秒自動量測太陽光散射輻射。

MODIS、MTPS、MFRSR、SBAD、SBADA 反演的氣溶膠光學厚度比較結果，除了個案 1 ( $0.1$ )、5 ( $0.05$ – $0.1$ ) 及 6 ( $0.1$ – $0.2$ ) 外， $\text{SRMSE}$  均小於 0.05，上述個案的誤差原因與在飛機上的觀測比對都一樣，係由於 MODIS 對沙塵反演，會高估氣溶膠光學厚度的特性所造成。

## 4. 有效粒徑及細粒徑百分比

在假設氣溶膠微粒是球體的前提下，我們比對 MODIS 反演與 AERONET 的觀測結果，過去的研究指出，MODIS 反演的細粒徑百

分比不是高於 0.8，就是低於 0.6，在 ACE-Asia 期間的結果更加明顯。

由於 MODIS 在洋面上的反演需排除水的干擾，而 90%AERONET 的觀測均在陸地，本研究只能選出幾個小島測站進行比對，包括韓國的 Jeju 島、Anmyon 島及日本的 Noto 島，比測的結果可以發現，MODIS 反演的細粒徑百分比，較 AERONET 的觀測低了 20%。另外氣溶膠中的非球面效應，AERONET 的觀測會稍微低估，但 MODIS 的低估更嚴重。2002 年 Remer 的研究指出，氣溶膠細粒徑愈多，兩者反演的結果愈接近，在 2000 年波多黎各的觀測實驗，沙塵個案中 MODIS 反演低估達 50%，

#### (五)利用 MODIS 近紅外線頻道反演水汽研究

目前在 NASA 的 TERRA/AQUA 衛星均裝載 MODIS 感測器來對地球上的陸地、海洋及大氣進行遙測。本研究將 MODIS 幾個近紅外線頻道利用數理方程式來反演水汽，這種數理方程式適用地球的反射在近紅外線區，例如陽光照射下的晴空陸地、雲區及海洋地區。這種數理方程主要依據來自地表和雲的日照近紅外線反射會被水汽吸收，水汽的吸收頻道主要接近 0.905、0.936 及 0.940 $\mu\text{m}$ ，這時大氣窗頻道在 0.865 及 1.24 $\mu\text{m}$ 。水汽比例會部份移除，隨不同地表改變的波長效應，因而代表在大氣中水汽的透射度。大氣中水汽含量主要來自理論方程式計算及使用對照表查詢而得到的透明度。

一般反演出來水汽量的誤差介於 5%到 10%之間，目前每日近紅外線水汽產品是 MODIS Level 2 資料，解析度是 1Km\*1Km，另外每日、每 8 日、每月近紅外線水汽產品是 MODIS Level 3 資料，解析度為 1 經度\*1 緯度，NASA 均會週期性產出。本小節利用水汽影響的案例與地面微波輻射儀進行比較。

##### 1. 利用 MODIS 近 IR 頻道的測值反演空氣柱中的水汽含量

0.865 $\mu\text{m}$  (Channel-2)、0.905 $\mu\text{m}$  (Channel-17)、0.936 $\mu\text{m}$  (Channel-18)、0.940 $\mu\text{m}$ (Channel-19)、1.240 $\mu\text{m}$ (Channel-3)，C17-C19 為水汽吸收頻道，C2 及 C3 為大氣窗區頻道，可用於反演植被和雲，利用水汽吸收頻道與大氣窗區頻道的比值，可以反演總水汽量。因此空氣柱中水汽量可以用輻射傳遞方程計算值與觀測值建立對照表(LUT)，這樣的誤差約在 5%至 10%之間，暗地

面及氣溶膠的環境背景中，反演的誤差會增大。晴空與雲的反演方程式不同。

反演的目標如下：

(1) 全球晴空條件下陸面上的空氣柱水汽含量。

(2) 雲層上的水汽含量。

(3) 洋面上太陽耀斑區的水汽含量。

洋面上空氣柱中的水汽含量，可以利用 11-13 $\mu\text{m}$  的大氣窗頻道及微波頻道所測量之輻射值進行反演。0.935 $\mu\text{m}$  為強水汽吸收頻道，在乾燥的環境，對水汽的反演十分有用。0.905 $\mu\text{m}$  為水汽弱吸收頻道，在潮濕的環境或太陽高度角很低的晴況下，對水汽的反演十分有用。

## 2. 測量太陽-地面-感測器輻射

利用 0.86 $\mu\text{m}$ -1.24 $\mu\text{m}$  波長測量太陽-地面-感測器輻射與以下因表有關：

(1) 大氣中水汽的吸收。

(2) 大氣中氣溶膠的散射

(3) 地面反射輻射

$$L_{\text{sensor}}(\lambda) = L_{\text{sun}}(\lambda)T(\lambda)\rho(\lambda) + L_{\text{path}}(\lambda)$$

$L_{\text{sensor}}(\lambda)$ ：衛星遙測

$L_{\text{sun}}(\lambda)$ ：太陽輻射

$T(\lambda)$ ：大氣透射比

$\rho(\lambda)$ ：地表反射率

$L_{\text{path}}(\lambda)$ ：路徑的散射輻射

在 1 $\mu\text{m}$  附近，Rayleigh 散射可以忽略， $L_{\text{path}}(\lambda)$  主要由氣溶膠

決定，且在這個頻道，它只有太陽直接反射輻射的一小部分(百分之幾)，在氣溶膠濃度很低時， $L_{path}(\lambda)$ 是太陽直接反射輻射中一個不變的量。

### 3. 利用頻道比值法計算透射率

(1)如果地面反射率不隨波長變化， $L_{path}(\lambda)$ 是  $L_{sun}(\lambda)$ 中的小項，水汽透射率可以由一個吸收頻道和一個窗區頻道的比值得到

$$T_{obs}(0.94\mu\text{m}) = \rho^*(0.94\mu\text{m}) / \rho^*(0.865\mu\text{m})$$

$$\rho^*(\lambda) = L_{sensor}(\lambda) / L_{sun}(\lambda)$$

(2)地面反射率隨波長是線性變化，水汽透射率可以由一個吸收頻道和二個窗區頻道的比值得到

$$T_{obs}(0.94\mu\text{m}) = \rho^*(0.94\mu\text{m}) / [C_1 \rho^*(0.865\mu\text{m}) + C_2 \rho^*(1.24\mu\text{m})]$$

$$C_1 = 0.8 ; C_2 = 0.2$$

$T_{obs}$  若有 0.01 的誤差，會導致大氣中水汽量反演時，出現 2.5% 誤差，利用輻射傳遞模式如 Lowtran7、Modtran 等，可以得到兩通道和三通道的比值，和空氣柱中總水汽量的 LUT。

### 4. 雲層上的水汽反演

雲中和雲上均有水汽，MODIS 在 0.8-2.5 $\mu\text{m}$  頻道中，包含了雲中和雲層水汽的吸收訊息。光學厚度較厚的卷雲又稱水雲，一般較低，光學厚度較薄的卷雲又稱冰雲，一般較高。由於卷雲複雜的吸收、發射和半透明性質，利用二氧化碳法反演的雲高經常比實際低。

根據氣候學數據，假設卷雲位於不同的離散高度，利用兩通道輻射比及假設的卷雲高，建立高層水汽指數。高層卷雲可以利用 MODIS IR 反演雲頂高；低層卷雲則需假設雲頂高是在海平面，來反演總水汽量。

為了瞭解水汽中分子與太陽輻射的交互作用，必須知道雲高，由於分子的吸收取決於大氣壓力，利用衛星資料很難正確得到低層

雲的高度，因此利用兩通道法來求低雲的水汽含量，需假設雲頂高在海平面，利用  $4\mu\text{m}$  以下的頻道，高層厚卷雲的雲頂高，可以用 MODIS 紅外線頻道來反演，利用兩通道法及紅外線頻道預估的雲頂高，可以反演厚卷雲上的總水汽量。由於卷雲較積雲高，因此在  $0.94\mu\text{m}$  水汽的吸收波段，卷雲遠小於積雲。

目前低光學厚度卷雲(冰雲)上層及內部的水汽量已經可以計算出來，近來利用 AVIRIS 在水面上的資料研究，以  $0.865$  及  $0.94\mu\text{m}$  的比值，可以反演水面上卷雲上層及內部的總水汽量。

## 5. 水汽反演的數學模式

$W=f_1W_1+f_2W_2+f_3W_3$  ( $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  為  $0.935$ 、 $0.94$ 、 $0.905\mu\text{m}$  三個頻道反演的水汽值， $f$  為權重係數)， $f$  是根據頻道上透射率  $T$  對總的可降水量( $W$ )的敏感度計算：

$$f = \eta_i / (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \quad \eta_i = |\Delta T| / \Delta W$$

權重函數可以利用可降水量與透射率的數值模擬曲線進行計算

輸入數據步驟如下：

- (1) 5 個頻道遙測數據。
- (2) 太陽高度角/方位角：將兩條路徑上的總水汽，轉換為垂直方向上的水汽量。
- (3) 雲(Cloud Mask)/海陸標記(land-water flag)：前者是用來判別像元是晴空點或是雲點，兩者聯合使用是為了確定反演方法採用兩通道法或三通道法。
- (4) 地面高度：由於分子的吸收與氣壓有關，因此在反演時需要有數位化的地面座標。
- (5) 地面溫度：用來選擇適當的大氣反演模式。

## 6. 不確定度估計

利用 MODIS 反演水汽可能產生之誤差來源：

- (1) 地表反射率的不確定性。

- (2) 遙測儀器定標的不確定性。
- (3) 混合像元和雲的影響。
- (4) 探測頻道漂移的影響。
- (5) 不同光譜頻道間像元匹配的不確定性。
- (6) 大氣溫濕度的不確定性。
- (7) 氣膠總量的不確定性。

其中第 1 項及第 7 項為最大誤差來源，總體而言，水汽的反演誤差約 13%，若利用 MODIS 資料考慮第 1 項及第 7 項，則誤差可以降到 7%。

當氣溶膠光學厚度在可見光波段上大於 0.3 時，在近紅外線水汽反演，需要考慮氣溶膠的影響。霾對水汽遙測的影響，在於霾總量和地面反射率的大小。當能見度 $\geq 20$  公里時，氣溶膠對水汽反演的影響很小，當霾出現時，能見度 $< 10$  公里或在  $1\mu\text{m}$  附近，地面反射率很小時( $< 0.1$ )，如果不對氣溶膠進行校正，利用大氣輻射模式反演的水汽誤差 $\geq 10\%$ 。反演出來的空氣柱中水汽含量可以與探空和微波偵測進行比較。

C-17 至 C-19 的透射函數誤差會導至空氣柱中的水汽含量反演出現系統性誤差，利用質量控制參數可說明反演產品的可信度。對於具有高反射性質的陸地，C-5 頻道的雜訊比 $\geq 100$ ，反演水汽量有較高可信度，對於具有低反射性質的海洋亦如此。質量控制參數分為兩類，一類是利用驗證數據對不同的氣候條件和地理位置區域進行分析，另一類是對全部數據集進行統計。

#### (六) 衛星對波狀雲之微物理特性反演個案研究：

MODIS 為在 1999 年 12 月發射之 Terra 衛星上的 5 個感應器中其中一個，2000 年 2 月底開始接收資料，該感測器也放在 2002 年 5 月發射的 Aqua 衛星，相關科學團隊也開始針對雲的偵測、雲物理及光學特性進行反演，這些反演產品可以應用在氣候變遷研究、氣候模式、數值天氣預報及基礎大氣科學研究。除此，雲貌、雲頂特性(壓力、溫度、有效散射率)、雲熱力相位、雲光學及微物理特性(光學厚度、粒徑、水汽路徑)亦同時進行。MODIS 資料分析，

主要在 1 公里或 5 公里解析度的 Level2 產品，這些產品包括晴空下的雲貌、雲頂特性(壓力、溫度、有效散射率)、雲熱力相位、雲光學及微物理特性(光學厚度、粒徑、水汽路徑)，相關反演方法同時應用到 Aqua 衛星上的 MODIS 結果，這個反演方程式稱為 Collection 004，已經在兩個衛星的 MODIS 資料上線操作應用。

近 25 年來航空業的發達，飛機廢氣排放對全球大氣中雲的覆蓋情形造成一定衝擊，從 1940 年 Weickmann(1950)到 1995 年之研究(Parungo, 1995)，飛機廢氣產生之凝結尾及伴隨卷雲的微物理特性已經引起科學家的注意。凝結尾的特性研究包括微粒大小、形狀、密度、化學特性及持續時間對卷雲發展所扮演的角色，並對區域及全球輻射收支的影響。模式的研究指出，高雲在能量收支的效應與雲中冰/水的狀態、溫度及微粒大小分布有關(Stephens et al., 1990)。因此探討不同形式凝結尾的微物理特性(例如生命期及分布範圍)與其它雲的特性一樣重要。

SUCCESS(Subsonic aircraft : Contrail and Cloud Effects Special Study)實驗計畫中，重要目的之一是利用遙測資料分析，探討反演雲的微物理特性。本研究藉由波段 8.5、11 及 12 $\mu\text{m}$  的亮溫紅外線產品反演微粒粒徑，反演方法為比較 8.5-11 及 11-12 $\mu\text{m}$  之亮溫差異，利用理論方程式進行推估。

SUCCESS 實驗計畫(Toon et al., 1996)是在勘薩斯州的薩林娜市(Salina Kansas)舉辦，日期為 1996 年 4 月至 5 月，利用美國太空總署(NASA)ER-2 高空偵查發機上的中解析度影像光譜儀高空探測器(MODIS Airbone Simulator)觀測到的飛機凝結尾、卷雲及山嶽波所產生的雲等。藉由觀測結果發現，飛機凝結尾及卷雲可以透過它們不同的輻射特性而明顯區分，利用 5 月 2 日山嶽波所產生雲的觀測反演微粒粒徑，與利用 NASA DC-8 飛機裝載之採樣器分析結果一致。另外利用 8.5 $\mu\text{m}$  頻道，可以明顯改善反演微粒粒徑小於 10 $\mu\text{m}$  之結果。

SUCCESS 觀測計畫中，可以就有限數量的雲個案進行微粒大小分布的觀測驗證，利用地面和衛星遙測資料比對，來改善雲及飛機凝結尾對輻射收支影響的瞭解。目前已經發展出利用衛星資料來觀測飛機凝結尾的數理方程式(Lee, 1989 ; Engelstad et al., 1992 ; Gothe et al., 1993)。這些文章利用 MAS(King et al., 1996)探討雲中微粒之粒徑。



本次密集觀測實驗是利用 NASA ER-2 飛機裝載 MAS 遙測資料與 DC-8 飛機觀測採樣結果進行比對研究，MAS 為放在地球觀測衛星系統的雛型(King et al., 1996)，MAS 資料主要提供可見光及紅外線產品來發展雲和氣溶膠的反演技術，並探討雲的微物理及輻射特性。

### 1. 衛星觀測微粒粒徑(Re)的反演及驗證

不同波段的亮溫溫度差異方法，主要是藉由不同雲種的光學特性及利用蒲朗克(Planck)的非線性函數來探討雲的輻射特性(Inoue, 1985; Lee, 1989; Parol et al., 1991)。Parol et al. 1995 年; Gothe 和 Grabl 1995 年; Duda 和 Spinhirnel 1996 年已經發展出利用紅外線資料來推估微粒大小分布之方法，這些方法主要將 11 和 12 $\mu\text{m}$  的亮溫差異(BT11-BT12)與模式推估之差異比較來反演微粒粒徑大小。

這些波段的敏感度取決於雲溫度、雲中微粒形狀、雲的不均勻度、晴空輻射的推估(Parol et al. 1995; Takano et al. 1996; Gothe and Grabl 1995; Duda and Spinhirnel 1996)等。前述這些敏感度研究，尚未利用衛星反演之微粒粒徑與地面觀測進行比較。

2. 本研究主要利用衛星 8.5、11 及 12 $\mu\text{m}$  三個波段進行反演，並藉由地面觀測進行驗證。這三個波段組合可以偵測雲及雲的特性(Ackerman et al. 1996)，Strabala et al. 1996 年更進一步利用 MAS 50 公尺解析度，來探討雲反演的技術，在 SUCCESS 期間的觀測結果顯示，飛機凝結尾與其它卷雲的輻射特性不同，可以區分兩種雲的差異，其中 BT8-BT11 < 2k 及 BT11-BT12 < 0.5k 代表晴空狀態。當 BT8-BT11 及 BT11-BT12 均增加，表示可穿透冰雲增加，亮溫差異的改變是冰/水狀雲、粒徑大小、形狀分布的函數。利用輻射傳遞模式的敏感度測試研究指出，飛機凝結尾與卷雲的微物理特性差異主要在凝結尾有較小的微粒。

3. 利用一個均勻的波狀雲案例來進行反演驗證，主要利用 MAS 亮溫差異與輻射傳遞模式的結果進行比對，模擬 8.5、11 及 12 $\mu\text{m}$  三個頻道的觀測結果所得的微粒粒徑。一般而言，晴空所積分出來的溫度，主要利用地面探空觀測結果來調整(校正)模式，使輸出結果與 MAS 觀測結果一致，模式中主要利用四種雲特性(雲頂、雲底高度、雲中的冰/水組成、雲中微粒的大小分布)來進行微粒粒徑(Re)的敏感度測試。

4. 5月2日 ER-2 及 DC-8 兩架飛機同時出動，對科羅拉多州的準均勻波狀雲進行遙測與實測採樣之比較，利用傾角 90 度 MAS 觀測與 BT8-BT11、BT11-BT12 的模式模擬結果，晴空  $11\mu\text{m}$  亮溫約為 297k，當雲中的冰/水成分(IWP)增加，BT11 減少，當 IWP 增加，BT8-BT11 與 BT11-BT12 會上升到一個最大值後再下降，為拱字形。陡峭的拱字形，代表在晴空與厚雲的個案，其數值是微粒大小和晴空與厚雲間亮溫差異的函數。BT8-BT11 模式結果，與觀測相當一致，更重要的是 BT11-BT12 對 Re 的反演與 BT8-BT11 對 Re 的反演並無太大矛盾。
5. Re 在 6 到  $8\mu\text{m}$  範圍，冰球面是適用的，而模式使用非球面微粒的計算，造成 BT8-BT11 與 BT11-BT12 推估 Re 的不同。除此，在這些波狀雲中使用球面微粒是合理的，即使它實際是準球面的冰粒(Heymsfield and Miloshevich 1993)。模式結果亦顯示，不同雲頂溫度(高度)對反演的結果並無太大之不同，與模式一致的是，MAS 亮溫，觀測到最大是可穿透雲(BT11: 230-270k)的情形，最大亮溫差異在波狀雲可穿透性的邊緣，最小亮溫差異出現在發展較好的厚雲部分。若增加  $8.5\mu\text{m}$  的頻道，相較於傳統的頻道(BT11-BT12)，可以增加小粒徑的反演結果。
6. MAS 的粒徑反演結果顯示，粒徑在  $6-8\mu\text{m}$ ，雲高度介於 9-10 公里，反演結果與 NASA DC-8 飛機兩種採樣(PVM, Particulate Volume Monitor, Gerber et al., 1994; CVI, Counter-Flow Virtual Impactor, Twohy et al., 2007)結果有很好的的一致性。在每 2 分鐘的採樣(約 25 公里距離)，ER-2 和 DC-8 對波狀雲有 50 秒的觀測時間差，在這段期間 PVM 的資料顯示微粒大小介於 5 到  $8\mu\text{m}$ ，平均的雲粒徑為  $5.8\mu\text{m}$ (Gerber et al., 1997)，CVI 的採樣結果，平均的雲粒徑為  $8.4\mu\text{m}$ ，顯示 5 月 2 日首次嚐試的波狀雲實驗結果，兩者相當一致，證明利用三個頻道來反演凝結尾與其它雲種 Re 的可行性。這次結果與 GOES-8 對 Re 的反演結果也是一致(Young et al., 1997)，SUCCESS 資料未來將持續使用來探討不同雲種的 Re，同時驗證反演的結果。
7. 由波狀雲的觀測中，可以發現包含不同冰/水成分的組成，在分析晴空與厚雲的情況下，這樣可以得到更好的雲頂溫度估計，作為模式的模擬。若沒有冰/水成分組成的情況下，只有利用光達(Lidar)觀測來反演微粒粒徑。

8. 利用  $8.5\mu\text{m}$  頻道來反演雲的粒徑大小(Re)，增加這個頻道資料，可以改善小微粒 Re 的敏感度。SUCCESS 實驗計畫利用 ER-2 和 DC-8 於 5 月 2 日，同時進行背風山嶽波產生的雲觀測，其反演之微粒粒徑 Re 介於  $6-8\mu\text{m}$ ，與利用 PVM 及 CVI 的採樣所分別得到的  $5.8\mu\text{m}$  及  $8.4\mu\text{m}$  平均粒徑一致。兩者相互驗證的結果顯示，利用方程式來反演飛機凝結尾及其它雲種的可行性及信心。

### (七)3D 輻射效應對於晴空反射及氣溶膠反演

#### 1. 煙、沙塵及大氣污染之氣溶膠，對大西洋淺雲發展的效應研究

雲發展在一個污染的環境下，會產生許多小的雲滴，這會抑制降水及延長雲的生命期，氣溶膠會吸收入射的太陽光輻射，因而減少雲量，因此氣溶膠對雲的淨效應，仍有其很大的不確定性。本研究利用 MODIS 1 公里解析度資料進行統計，探討氣溶膠對大西洋淺雲發展的效應，實驗進行時間在 2002 年 6 月至 8 月，將大西洋氣溶膠分成四類：海洋性氣溶膠 ( $30^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$ )；煙氣溶膠 ( $20^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$ )；沙塵氣溶膠 ( $5^{\circ}\text{N}-25^{\circ}\text{N}$ )；空氣污染氣溶膠 ( $30^{\circ}\text{N}-60^{\circ}\text{N}$ )，這四類都會影響雲滴粒徑的大小，從乾淨、污染、煙、沙塵，淺雲量會隨之增加，透過這 4 個區域 3 個月的研究，氣溶膠的效應並不一致，未來仍需透過地面觀測及模式模擬來瞭解這些機制。本次研究結果，氣溶膠對淺雲及太陽輻射的效應為  $11\pm 3 \text{ W/m}^2$ ，其中  $2/3$  是由氣溶膠產生的雲所造成，另外  $1/3$  是氣溶膠的輻射效應。

#### 2. 3D 輻射效應對於晴空反射及氣溶膠之反演

在背景為暗地表，可以計算出巴西生質燃燒區的積雲反照率為 0.023，這樣的結果顯示，雲陰影會減少陽光及造成反射量增加，這樣 3 維效應，對晴空區的影響，從 -0.015 到 0.018，平均值為 0.004，標準差為 0.006，這樣低的平均值，主要是散射增加及陰影減少日照的中和所造成。晴空區因反射增加量與最近雲的距離成一函數，最大值出現在距離 2 公里的雲，之後隨距離遞減。

在 2 公里以下的最近雲距離，當距離增加，積雲的陰影區隨之減少，在此區域，陰影效應大於散射效應，在反演氣溶膠時，其結果並不可靠。在 2 公里以上的最近雲距離，反射的強化效應隨距離而減少，因此愈接近 2 公里，氣溶膠的反演偏高愈大，距離 3 公里時，仍會偏高 0.004，1 維氣溶膠反演光學厚度高估約 0.04，

一般大氣的反演光學厚度高估約 0.1。

另外，氣溶膠的垂直分布也會有加強的效應，高度愈高的氣溶膠，效應愈大，愈少陰影的影響。在本研究中，假設氣溶膠水平均勻分布，但在實際的大氣中，在積雲附近的氣溶膠特性，對反演的結果也變得更加複雜。3 維效應的大小與太陽的天頂角有很大關係。總之，積雲的 3 維效應對瞭解氣溶膠的量很重要，因此在利用 1 維來反演氣溶膠與雲的交互作用，應更加注意。

#### (八) 第 12 屆雲物理及輻射研討會(workshop)

本次國際研討會議於 2006 年 7 月 10 日至 14 日於美國威斯康辛州的麥迪森市舉行，由美國氣象學會(The American Meteorological Society)主辦，參加者來自美國、加拿大、英國、荷蘭、以色列、日本、中國、台灣等國家的科學家，於會中進行大氣遙測、雲物理、輻射傳遞、沙塵暴氣溶膠等方面的研討，交換研究成果，會議的相關資訊可以於主辦單位網站(<http://ametsoc.org/meet/fainst/madison2006.html>)查詢。(如附件)研討會主要分成大氣輻射及雲物理 2 個主題進行，議程介紹如下：

##### 1. 7 月 10 日

###### (1) 大氣輻射主題

包括雲及氣溶膠對於遙感探測的三維立體效應(Remote Sensing of Clouds and Aerosols : Three-Dimensional Effects)、地球輻射收支的貢獻(The Earth' s Radiation Budget : General contributions)等 2 個子題，各有 6 個科學研究發表。

###### (2) 雲物理主題

層雲效應探討(Stratiform clouds)，共有 12 個科學研究發表。

##### 2. 7 月 11 日

###### (1) 大氣輻射主題

包括地面輻射特性的觀測與模式(Observations and Modeling

of the Surface Radiative Properties)、利用光達雷達進行雲及氣溶膠的遙感探測 (Remote Sensing of Clouds and Aerosols: Cloud Lidar and Radar)等 2 個子題，各有 6 個科學研究發表。

## (2) 雲物理主題

卷雲效應探討(Cirrus clouds)，共有 12 個科學研究發表。

## 3. 7 月 12 日

### (1) 大氣輻射主題

包括輻射與雲及氣溶膠的交互作用(Interaction of Radiation with Clouds and Aerosols)、雲及氣溶膠的遙感探測 (Remote Sensing of Clouds and Aerosols)等 2 個子題，各有 6 個科學研究發表。

### (2) 雲物理主題

對流雲效應探討(Deep Convective clouds)，共有 12 個科學研究發表。

## 4. 7 月 13 日

### (1) 大氣輻射主題

包括輻射傳遞參數化及理論研究(Radiative Transfer Parameterizations and Theory)、地球輻射收支地面通量研究(The Earth's Radiation Budget: Surface fluxes)、雲和太陽輻射作用(Clouds and the Earth's Radiant Energy System)、輻射測量及遙測方法及技術(New Approaches to Radiation Measurement and Remote Sensing)等 4 個子題，各有 6 個科學研究發表。

### (2) 雲物理主題

洋面積雲的降水實驗計畫(Rain in Cumulus over the Ocean Experiment, RICO)、雲物理理論探討(Philosophy/perspectives)、積雲效應(Cumulus clouds)共有 24 個科學研究發表。

## 5. 7月14日

### (1) 大氣輻射主題

包括地球輻射收支資料合成分析(The Earth's Radiation Budget: Data Synthesis)、最新雲及氣溶膠遙測技術(Remote Sensing of Clouds and Aerosols: New Passive Techniques)等2個子題，各有6個科學研究發表。

### (2) 雲物理主題

降水效應探討(Precipitation)，共有12個科學研究發表。

## 6. 以下選擇「沙塵暴的發生及傳輸與對流擾動的影響探討」研究做簡要重點說明：

(1)發表者：Tetsuya Takemi, Dept. of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan

(2)目前對於沙塵暴的發生及傳輸，不僅對短期的人體健康、農業發展、交通運輸及工業發展有影響外，其沙塵氣溶膠對全球氣候的衝擊也需要進行評估。沙塵暴的發生除了搭配大尺度的綜觀環流外，小尺度的擾動也是重要的條件之一，2005年 Koch and Renno 估計，邊界層垂直擾動對流產生的沙塵占全球沙塵收支的35%。

(3)另外一個引發沙塵暴的重要條件之一，為強烈的日照，其產生的對流可以到達4公里，有助於沙塵的長程傳輸，通常在1公里到1.5公里以上就會進入西風帶，隨著噴射氣流很容易向外輸送。

(4)在邊界層，沙塵的垂直混合主要利用淺對流作用，若發生在積雲的深對流區，高濃度的沙塵不僅出現在邊界層，連較高的對流層都受到明顯的沙塵影響。乾燥或潮濕的對流也相當重要，一般而言，沙塵在乾燥的對流效應較潮濕環境強。

(5)在大氣高層有動能往地面傳遞時，有助強風的生成，在超過一定的風速下，就能夠引發沙塵暴，一般在白天受陽光日照對流的條件下容易發生，引起沙塵暴的條件主要來自綜觀的

大氣擾動。

- (6) 在粗、細粒徑的微粒模擬過程中，空氣柱內的沙塵分布有很大的不同，比對高、低解析度的模擬結果，可以發現在次網格內的垂直擾動扮演相當重要的角色，因此淺、深對流效應，對沙塵暴的引發及傳輸都有不同的影響。

#### (九) 氣溶膠高空採樣短期訓練

本次氣溶膠高空採樣短期訓練於 7 月 24 日至 8 月 4 日於 Howard 大學 Beltsville 實驗研究測站進行，該測站設置於華盛頓哥倫比亞特區(Washington D.C)東北方 12 英哩處，地理座標為北緯 39.054°；西經 76.877°，為草地區，鄰近農作物區及工廠，測站設置目的為加強 Howard 大學對大氣觀測實驗的研究，提昇天氣、氣候及空氣品質預測，並作為學生實作訓練使用，同時加入國內及國際氣候及環境監測網(SURFRAD, CEOP, BSRN 等)

Howard 大學大氣科學研究中心(NCAS)持續由美國海洋大氣總署(NOAA)、教育合作研究計畫(EPP)、美國太空總署(NASA)及環保局資助，進行天氣、空氣品質及氣候預測等相關研究，測站設置於華盛頓哥倫比亞特區(Washington D.C)東北方 12 英哩處，本次短期訓練計畫主要進行地面通量、邊界層、雲光學厚度特性、氣溶膠、氣體濃度、降水觀測實驗研究。

這些觀測系統包括：

- 31 公尺通量觀測塔及地面下的土壤感測器。
- 探空系統(臭氧及氣象觀測)
- 微波輻射計(觀測氣柱中總水汽量)
- 向上及向下 PAR、pyranometers、pyheliometer(只有向上)地面輻射能量收支觀測儀
- 光譜偵測儀：包括多過濾旋轉波段光譜偵測儀(MFRSF)、旋轉波段光譜偵測儀(RSS)，觀測雲及氣溶膠光學特性
- 全天輻射計
- Raman 光達：觀測氣溶膠及水汽垂直剖面
- 雨量筒及 C 波段都卜勒雷達：觀測降水

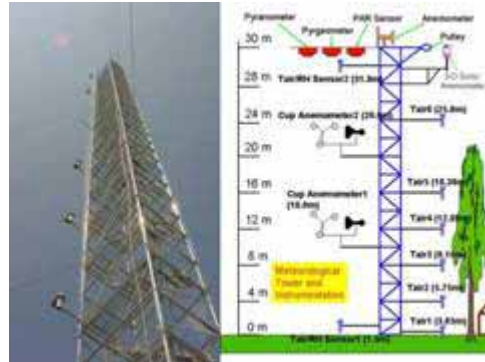
研究級空氣品質監測站也設置在 Howard University Beltsville 實驗研究測站，由環保局負責運轉，測站內有氣體及懸浮微粒監

測儀器，搭配有地面、高空氣象觀測、剖風儀雷達及聲波溫度觀測系統。

以下分述各項觀測系統作業：

### 1. 地面通量觀測

研究不同地表異質性對大氣與陸地交互作用研究，觀測邊界層重要參數，驗證中尺度數值模式。



### 2. 地面能量收支觀測

長期提供不同地表 1 分鐘高解析度之地面散射(irradiance)監測，作為衛星資料校驗及雲對輻射的影響研究，並與大氣輻射觀測實驗計畫(ARM)合作，資料品管與短波通量分析反演方程式，由 Charles N. Long 博士研發，可以計算晴空短波過濾函數。

### 3. 臭氧垂直觀測

華盛頓特區是美國東岸人口密集區，影響地面臭氧濃度超過標準次數，在 2004 年夏季，本測站被選為臭氧垂直剖面觀測網研究計畫(IONS)場地，進行北美國地區臭氧傳送相關研究，來自 Howard 大學及馬里蘭大學學生被訓練進行探空氣球施放前置作業、施放及後續資料分析等工作，本地點同時被環保局選定作為改善空氣品質預報的實驗場地，作為提供更好之高臭氧管制策略。

### 4. 降水觀測

Howard 大學降水研究計畫，主要作為瞭解西非塞內加爾降水分布基礎研究，場地內有 4 個雨量筒，這項研究主要作為熱帶降雨測量衛星(TRMM)降水感測器觀測結果校驗，由 NASA、Howard 大學、North Dakota 大學及塞內加爾科學家負責。

### 5. 跨領域區域大氣變化

持續進行監測，包括光達及雷達、寬波段及窄波段輻射計、氣體分析儀(臭氧、氮氧化物、水汽、二氧化碳及揮發性有機化合物)、



氣象儀器(探空氣球、聲波風速計)，探討不同資料分析方法及研究人員經驗相互交流等。

## 6. 氣象觀測儀器介紹

### (1)CSAT3 聲波風速計

聲波風速計可以量測三維的風向量，可以利用它們計算渦流變化、可感熱及通量等。



### (2)LI-COR 7500 氣體分析儀

LI-COR 7500 是紅外線開徑式氣體分析儀，可以用來測量高解析度的水汽、二氧化碳濃度，然後搭配 CSAT3 聲波風速計，可以計算潛熱、二氧化碳通量。



### (3)R. M. Young 傳統風速計

R. M. Young 傳統風速計設置於通量塔的頂端(不受遮蔽)，用來測量水平風向及風速。



### (4)相對濕度及溫度感測器

設置於不受陽光直射的通風處，以偵測大氣的相對濕度及溫度。



#### 四、心得與建議

- (一)MODIS 是監測氣溶膠的一項新科技利器，它是裝載在美國太空總署(NASA)發射的TERRA及AQUA衛星上面，TERRA衛星是在1999年12月發射；AQUA衛星是在2002年5月發射，MODIS具有36個頻道，可以觀測0.41-15 $\mu\text{m}$ 間的不同波段，空間解析度方面，有兩個頻道是250公尺；5個頻道是500公尺；另外29個頻道是1公里。因此利用MODIS資料，可以瞭解氣溶膠的特性，並區分人為及自然界所產生的氣溶膠，藉以估計其對氣候的影響。
- (二)經利用地面觀測資料與MODIS的反演進行比對，其結果相當一致，但仍有一些特殊區域，比對的結果顯示反演方程式仍有改善空間，後續的研究也針對這些區域進行瞭解，並提供改善的方程式。在ACE-Asia密集觀測實驗期間，利用MODIS衛星資料來反演西太平洋氣溶膠特性，由於沙塵微粒的非球面特性、垂直分布，及夾雜都會區及工業區污染，使得利用短紅外線頻道反演出來氣柱中的氣溶膠結果變的複雜。
- (三)2001年春天，在西北太平洋進行的ACE-Asia觀測實驗，透過MODIS的反演，提供大範圍的氣溶膠特性資料。一般而言，離東亞陸地愈遠，氣溶膠光學厚度愈小，較高的光學厚度出現在北緯30-50度的沙塵輸送區(月平均光學厚度0.4-0.7)，最小的月平均光學厚度(0.08-0.12)出現在這次觀測實驗區域的東南邊(北緯10-20;東經150-160)，細粒徑百分比從最乾淨的0.5到東南亞(0.8)受生質燃燒影響區域。另外，有效粒徑的月平均從0.3到0.8 $\mu\text{m}$ 。在4個沒有受到沙塵影響區域，MODIS反演的氣溶膠光學厚度與在船上或飛機上的輻射計量測結果一致(SRMSE < 0.05)。
- (四)CLAMS(The Chesapeake Lighthouse and Aircraft Measurements for Satellites)實驗觀測計畫，主要利用MODIS衛星資料提出反演方程式，對地球輻射收支及全球氣候變遷進行估計，氣溶膠是其中反演出來的參數之一，對地球能量的傳遞及水文循環扮演重要的角色。懸浮在空中的微粒會反射或吸收太陽的輻射，同時可以變成雲的凝結核，影響雲物理過程。氣溶膠也會影響人類的健康，降低能見度，其來源包括自然界，例如風揚起之沙塵或波浪帶起的海鹽等，另外一種是因人為活動所產生的，包括都會區/工業區的污染或生質燃燒等。由於氣溶膠的特性，它不像氣體可以均勻混合分布，因此在估計其對氣候變遷及

水文循環會有  $2W/m^2$  的不確定度，因此全球氣溶膠的區域特性分布，是目前科學界對 MODIS 反演結果研究工作的重點之一。

- (五)利用全球的氣溶膠分布，可以瞭解地球的氣候狀況，並估計對氣候變遷的潛在影響，在 Terra 及 Aqua 衛星上的 MODIS 感測器，可以全天候進行全球陸地及海洋的觀測，利用其多頻道(從可見光到中紅外線)高解析度輻射的觀測，掌握氣溶膠的特性分布。經由不斷改進所發展出的氣溶膠反演方程式，可以計算出光學厚度、粒徑參數及大氣層頂的輻射通量。
- (六)利用微粒的累積，可以區分沙塵及一般氣溶膠，例如煙霧或硫酸鹽，可以利用  $0.47\mu m$  及  $0.66\mu m$  頻道氣溶膠輻射。新的動力氣溶膠模式對於生質燃燒氣溶膠、沙塵、來自都會區及工業區的氣溶膠，可以利用這個反演方法決定氣溶膠光學特性，反演的氣溶膠光學厚度  $\tau_a$ ，其誤差  $\Delta\tau_a=0.05\pm 0.2\tau_a$ (換句話說為 20%誤差，粒徑介於  $0.1-3\mu m$ )，每日的空間解析度為  $10km*10km$ ；選擇散射角度，計算 8 天及月合成的光學厚度、氣溶膠質量濃度及光譜的輻射強度，利用每日在海洋及陸地氣溶膠的相關資訊，搭配地面氣溶膠觀測，可以作為氣溶膠氣候特性研究。監測幾個特殊氣溶膠型式的源(source)與匯(sink)，也可以研究氣溶膠與水汽、雲及其本身對氣候輻射強迫間的交互作用，同時校驗衛星遙測結果。
- (七)利用 EOS 上的 MODIS，使用黑陸地目標(dark land targets)方法，反演每日陸地上氣膠光學厚度及氣柱質量濃度的分布，黑陸地主要範圍包括植被區、在紅色及藍色頻道所觀測到的黑土壤區(dark soils)，因此這種方法會被限制在陸地上的濕區(不包括水或冰/雪覆蓋區)。MODIS 上線運轉後，有助瞭解氣溶膠的分布，未來這樣遙測技術應該可以運用在東亞地區沙塵暴觀測及預報、熱帶地區的生質燃燒、中緯度都會區及工業污染等方面，都是未來區域污染跨境傳輸追蹤可以持續運用的方法。
- (八)氣溶膠的輻射效應會減緩溫室氣體對大氣的增溫，減少日照的輻射，進而影響到氣候，氣溶膠對雲量增加的效應超過雲頂氣溶膠對輻射的影響 3 到 5 倍，傳統的作法遠低估它的效應。根據前述的研究，氣柱中氣溶膠的濃度增加，光學厚度增加  $0.03-0.5$ ，造成淺雲量增加  $0.2-0.4$ ，雲分布範圍可以增加到幾千公里，主要發生在煙及沙塵區，雲滴減小 10-30%。因此未來應進一步瞭解沙塵暴造成大氣中氣溶膠的增加，其輻射效應對雲滴的影響，

甚至對全球氣候的評估，都是未來可以再做進一步的研究主題。

- (九)利用 MODIS 與 AERONET 的反演資料進行比對驗證，可以得到陸地上光學厚度的差異在 0.1 以內，洋面上的誤差在 0.035 以內，然而在低光學厚度區( $<0.15$ )，由於對儀器的校正很敏感，其誤差較大，不確定性也高。沙塵的微粒非球面特性也會影響氣溶膠的反演結果，因此 MODIS 的氣溶膠反演方程式，不管在陸地上或洋面上，都有再繼續改善的空間。
- (十)本署自 2002 年開始進行東亞地區沙塵暴密集觀測計畫，過去傳統均以懸浮微粒監測採樣的點式作法，來瞭解沙塵對空氣品質的影響，隨著遙測科技的進步，利用地球觀測衛星上的 MODIS 感測器，可以進一步瞭解大區域及高空間解析度的氣溶膠分布，不管是對區域污染傳送的瞭解或全球氣候的衝擊評估，都有相當的助益。
- (十一)未來本署與中央氣象局合作接收的 Terra、Aqua 衛星上的 MODIS 資料，應可再作進一步的加強應用，包括沙塵暴追蹤預報及空氣污染的解析等作業，MODIS 一、二級產品，包括氣溶膠光學厚度(AOD)、火點分布、全彩影像(RGB)、雲貌、總臭氧量等，未來都可以納入區域動力模式的初始及驗證資料，有助提昇東亞沙塵暴及空氣品質的觀測與預報作業。
- (十二)此次參加第 12 屆雲物理及輻射研討會，有來自各國對雲物理、輻射、高空沙塵等對遙測技術研究的科學家，將個人最新的研究成果發表，進行交流及研討，有助相關領域的科學研究。由於全球氣候變遷，已是未來科學研究的一個重要課題，不僅影響全人類的生活，亦對環境產生衝擊，這樣的科學研究並無國界的區分，我國政府單位及學術界應可在遙測技術的相關議題持續進行關注及推動研究。
- (十三)此次參加氣溶膠高空採樣短期訓練，深入瞭解如何利用地面輻射、氣溶膠、通量等觀測資料，來驗證衛星的遙測結果，一般地面觀測均屬於點的型式，衛星可以進行全面的觀測，因此有必要持續驗證衛星上各個感測器的準確度及精密度，配合全球或區域模式的模擬，充分掌握全球氣候及環境的變遷。

表 1 九十五年度公務人員出國專題研究計畫執行書

九十五年度公務人員出國專題研究計畫執行書		
姓名	(中文) 吳權芳 (英文) Chiuang-Fang, Wu	
服務機關 (學校)	行政院環境保護署 職稱 薦任技正	
核定研究 項目	沙塵暴高空採樣及檢測技術研究	
前往國家	美國	
研究學校(機 構)名稱、地點	(中文) 美國航太總署戈達太空中心(馬里蘭州)	
	(英文) National Aeronautics and Space Administration(NASA Goddard Space Flight Center, 8800 Greenbelt Road - Code 130 Greenbelt, Md 20771)	
研究起始日	95年 7月 1日	
研究結束日	95年 9月 30日	
研 究 計 畫	主要內容	本次出國專題研究計畫，係赴美國太空總署進行沙塵暴高空氣溶膠(aerosol)分析技術研究，並與 Marshak 和 Wen 博士使用衛星 MODIS 觀測資料進行沙塵暴高空採樣、檢測及氣溶膠與雲輻射交互影響技術研究，同時與 Chu 及 Hoff 博士利用 MODIS 和光達資料來修訂及反演氣溶膠方程式。
	擬修習課程	利用 MODIS 衛星遙測技術，反演氣溶膠、光學厚度、火點機率、地表植被指數、全彩影像等資料，進行沙塵暴高空氣溶膠(aerosol)分析技術研究。
	觀摩實習計畫	本次出國專題研究計畫，除赴美國太空總署進行沙塵暴高空氣溶膠(aerosol)分析技術研究，並參加第 12 屆雲物理及輻射研討會(workshop)，研究期間將積極參加有關衛星遙測沙塵暴高空採樣及檢測技術相關主題研討。7 月 24 日至 8 月 4 日參加氣溶膠高空採樣短期訓練，提昇沙塵高空採樣技術。觀摩實習計畫詳如附件三。
	預及期達成目標	1. 利用 MODIS 衛星遙測技術，掌握沙塵暴動向及傳輸情形。 2. 利用 MODIS 36 個頻道資料及不同解析度(250 公尺、500 公尺及 1000 公尺)，反演氣溶膠、光學厚度、火點機率、地表植被指數、全彩影像等資料。 3. 利用 MODIS 衛星遙測資料，掌握高空沙塵及地表氣溶膠分布，有效瞭解我國空氣品質之區域變化，有助業務推動。
附註	※表內各欄均請詳實填寫，如篇幅不敷使用，請另紙繕附。	

附件三

九十五年度出國專題研究觀摩實習計畫表

日期		起 訖 地 點	研 究 內 容	前 往 機 構	備 註
月	日				
7	9	馬里蘭州至威斯康辛州	參加第 12 屆雲物理及輻射研討會起程	美國氣象學會	
7	10	威斯康辛州(麥迪森市)	參加第 12 屆雲物理及輻射研討會	美國氣象學會	
7	11	威斯康辛州(麥迪森市)	參加第 12 屆雲物理及輻射研討會	美國氣象學會	
7	12	威斯康辛州(麥迪森市)	參加第 12 屆雲物理及輻射研討會	美國氣象學會	
7	13	威斯康辛州(麥迪森市)	參加第 12 屆雲物理及輻射研討會	美國氣象學會	
7	14	威斯康辛州(麥迪森市)	參加第 12 屆雲物理及輻射研討會	美國氣象學會	
7	15	威斯康辛州至馬里蘭州	參加第 12 屆雲物理及輻射研討會返程	美國氣象學會	
7	24	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
7	25	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
7	26	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
7	27	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
7	28	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
7	29	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
7	30	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
7	31	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
8	1	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	

8	2	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
8	3	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	
8	4	華盛頓哥倫比亞特區	參加短期訓練	美國 Howard 大學	

出國人員簽章：\_\_\_\_\_

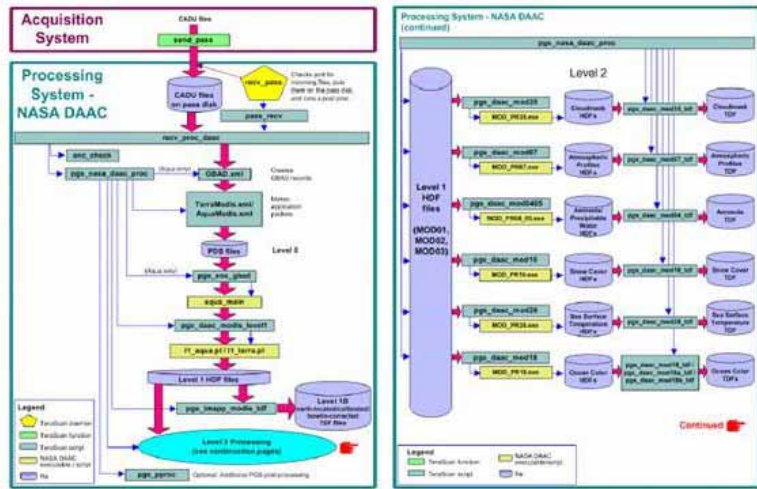


圖1 MODIS資料處理分析示意圖

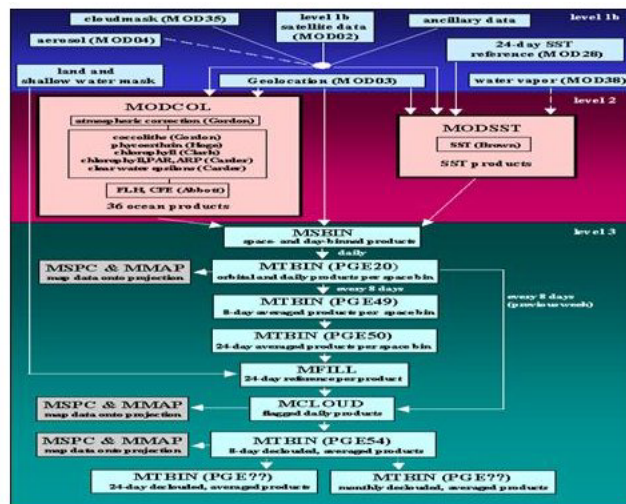


圖2 MODIS影像產品分析流程示意圖



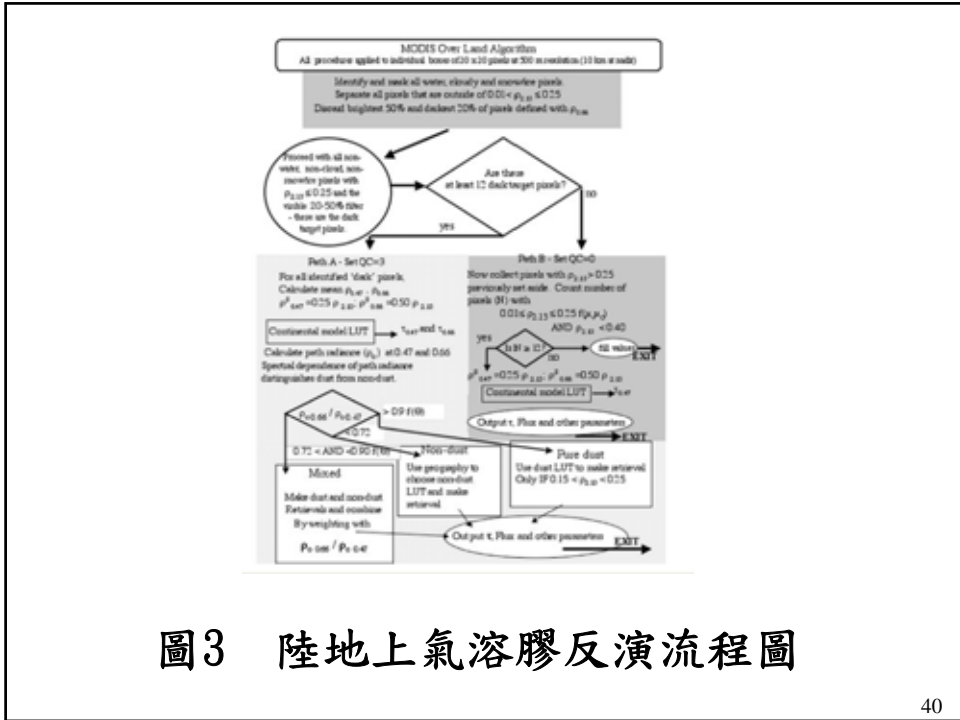


圖3 陸地上氣溶膠反演流程圖

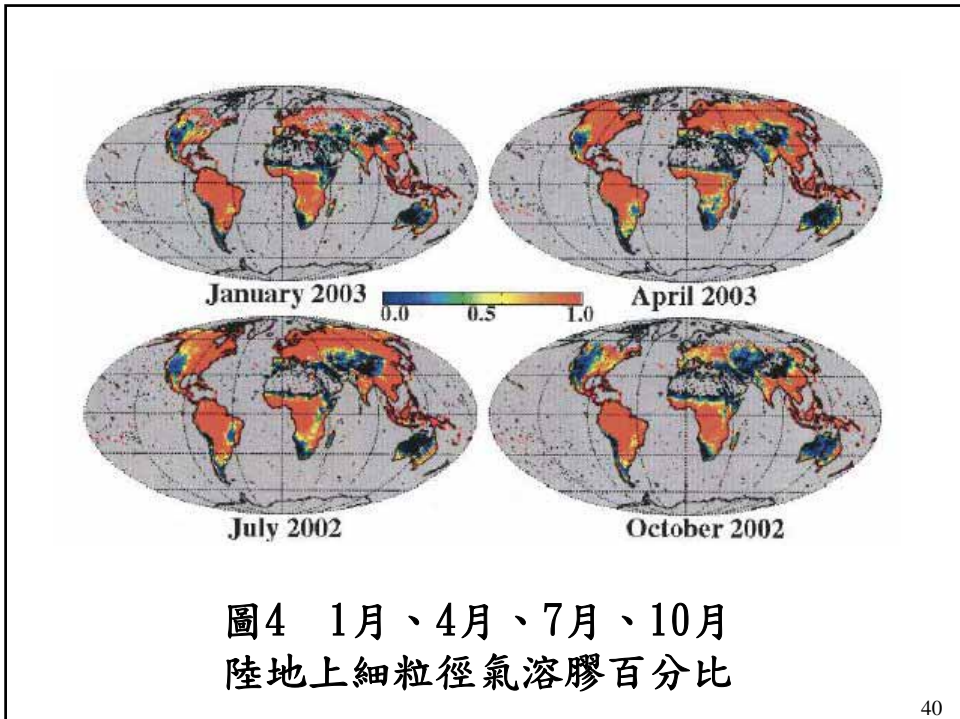


圖4 1月、4月、7月、10月  
陸地上細粒徑氣溶膠百分比

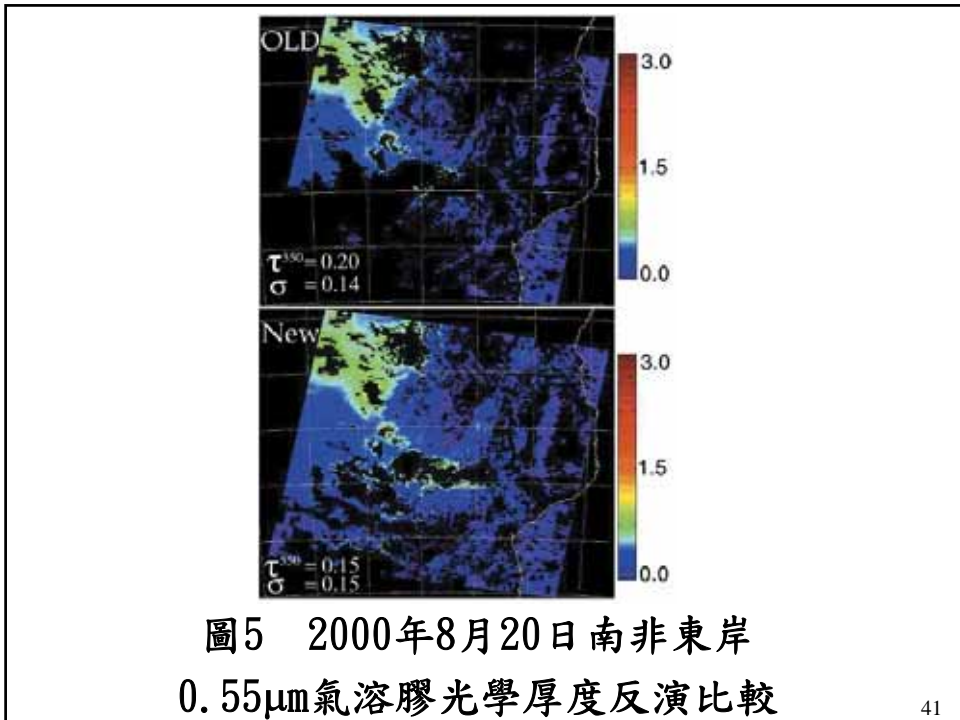


圖5 2000年8月20日南非東岸  
0.55 $\mu$ m氣溶膠光學厚度反演比較

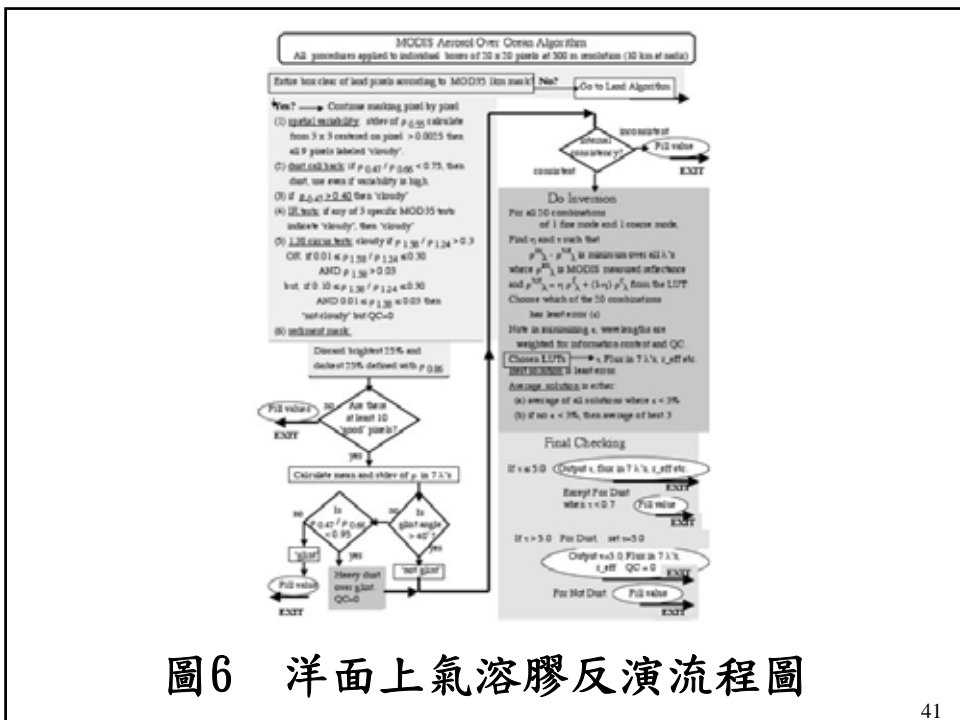


圖6 洋面上氣溶膠反演流程圖

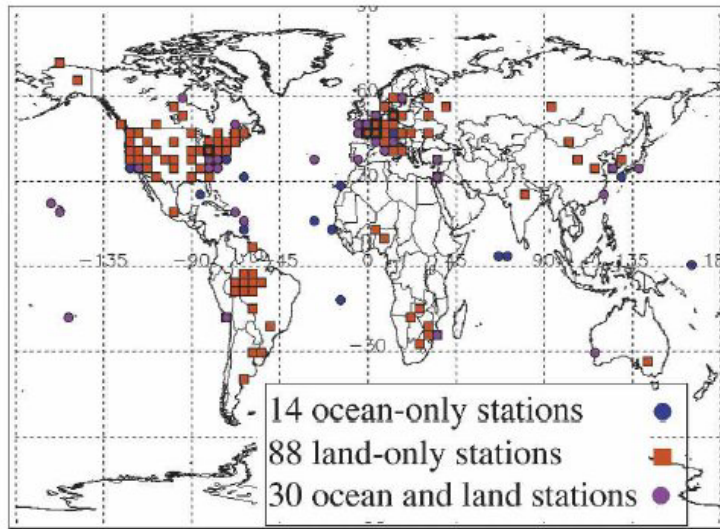


圖7 全球地面氣溶膠監測網

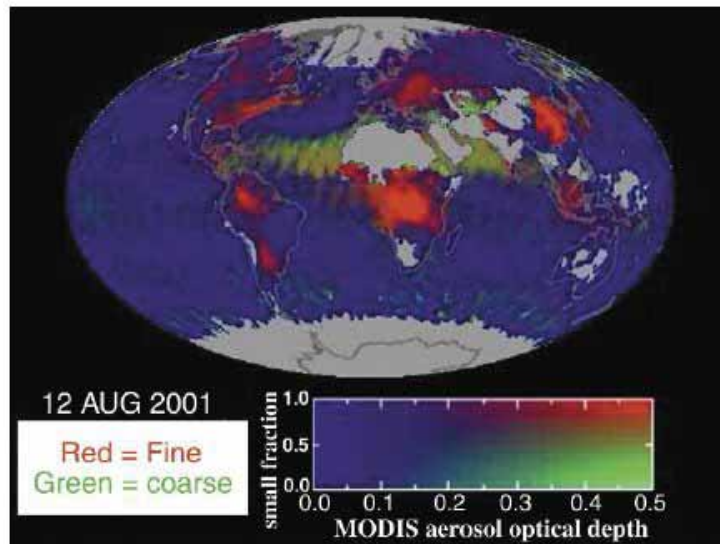


圖8 MODIS全球的氣溶膠反演

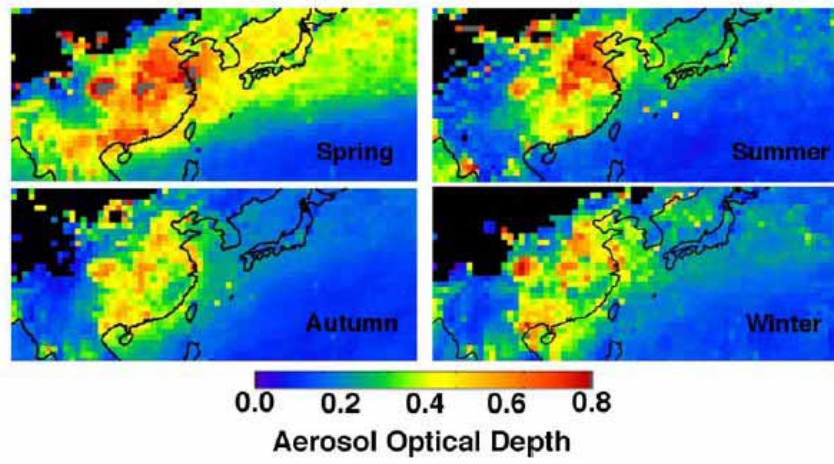


圖9 東亞地區氣溶膠季節性分布

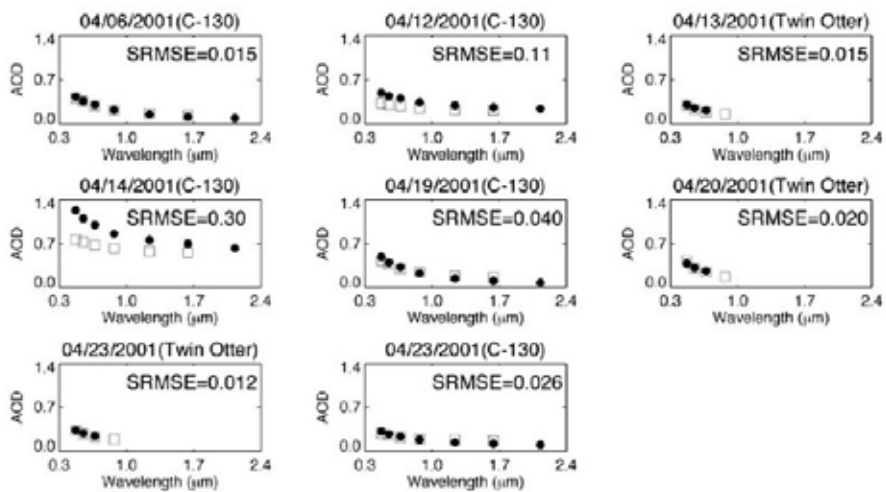


圖10 洋面上MODIS與AATS比對

# 附件

第 12 屆雲物理及輻射研討會  
會議資料