

地球同步衛星（Himawari-8）在逐時大氣氣膠光學厚度之反演與分析

張淵翔¹、孫達旻¹、張國恩²、曾聖凱²、林唐煌^{1,2}

¹ 國立中央大學太空及遙測研究中心

² 國立中央大學太空科學研究所

摘要

最新一代地球同步氣象衛星—向日葵八號（Himawari-8, H-8）已於 2014 年發射，並在 2015 年 7 月 4 日正式運作，其裝載著高像素紅外線成像儀（Advanced Himawari Imager, AHI），可提供高達 16 個不同波長的光學頻道、1 公里空間解析度以及涵蓋整個東亞和太平洋地區每 10 分鐘一筆超高時間解析度的影像資料，因此若能藉由氣膠光學厚度（Aerosol Optical Depth, AOD）對於向日葵八號衛星資料反演機制的建立，即能有效應用氣膠光學厚度與懸浮微粒濃度的轉換關係，進一步提供大範圍即時的空氣品質資訊。因此，本研究最主要的目的在於透過事先建立好的參考影像反射率及背景氣膠光學厚度資料庫，經由初步過濾雲蔭的步驟，搭配時間序列疊代對比演算法，反演大範圍且即時的目標影像氣膠光學厚度。

初步結果與 MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer（MODIS）的氣膠光學厚度產品比對後，顯示有相當之空間分佈匹配性，然而如果進一步與地面測站 AErosol Robotic NETwork（AERONET）觀測資料進行比較的話，還是會發現到有些微高、低估的情形發生，研判為受到選取視窗內的雲蔭比例以及地物種類複雜程度之影響，導致反演過程中有些許的誤差產生，但整體的反演結果還是具備相當之精確性與可信度，可用於提供不同頻道且高時空解析的向日葵八號衛星氣膠光學厚度產品。同時，一旦氣膠光學厚度與懸浮微粒濃度轉換關係式建立後，持續進一步透過衛星資料來監測長時間大範圍空氣品質汙染的程度，將是本研究未來最重要的任務之一。

關鍵詞：氣膠光學厚度、向日葵八號衛星/高像素紅外線成像儀、高時間疊代對比演算法、MODIS、AERONET

一、前言

現行透過衛星資料來反演氣膠光學厚度的方法有非常多種，包括：暗物法（Dark Target Method, DT）、深藍頻道法（Deep Blue Method, DB）、Merged algorithm、MAIAC algorithm、對比法（Contrast Reduction Method, CRM）以及其他相關大氣校正模式與統計方法等方式求取，目前學術界氣膠光學厚度反演多以暗物法、深藍頻道法與對比法可信度與使用性最高，而本篇研究則嘗試將對比法套用於地球同步衛

星資料氣膠光學厚度求取上，因此特別針對對比法進行介紹。

一般來說，若在地表物不隨時間改變的前提下，假設衛星不同時間所觀測到之顯反射率差異，主要為氣膠濃度改變影響所致，並透過此差異進而求取氣膠光學厚度之方法，即所謂的對比法。此方法來自於氣膠對於大氣會產生模糊效應（Blurring Effect）的影響，當高反射率物體，因大氣散射影響，衛星所接收到的反射率會減少；而相反地，當低反射率物體，透過大氣散射影響，則為增加衛星接收到的物體反射率，因

此基於這樣的效應，當氣膠濃度高時，表示光受到大氣散射機會增加，模糊效應就會增強，反之亦然，所以如果配合一已知的大氣氣膠光學厚度，則其他時間的氣膠光學厚度，便可透過大氣輻射傳輸方程一一推導獲得。

Sifakis與Deschamps等人最早於1992年發展出一套對比法—離散係數法（Dispersion Coefficients Method, DCM）應用於SPOT系列衛星資料上，獲得相當不錯的結果，但根據文獻回顧，事實上對比法會受到衛星觀測幾何、地物改變和地形效應之影響，並且根據選取之視窗大小及視窗內地表變化程度，也會直接影響到對比法反演之結果，因此過去的研究，均採用高空間解析度之繞極軌道衛星資料，如Landsat、SPOT及AVHRR等，反演都會地區小範圍氣膠光學厚度分布。

因此，本研究嘗試使用向日葵八號衛星資料，假設地表物不隨時間改變前提下，利用參考影像與目標影像之間的差異，套用離散係數法，反演出目標影像之大氣氣膠光學厚度，並評估與測試此方法之適用性及可行性，嘗試在未來透過衛星資料，建立一套空氣品質監測資料庫。

二、研究資料與處理

(一)向日葵八號衛星(Himawari-8)資料

向日葵八號衛星搭載著高像素紅外光成像儀（Advanced Himawari Imager, AHI），相較於日本上一代地球同步氣象衛星（MTSAT-1R/2），可以提供將近三倍之多的觀測頻道，包括3個可見光波段頻道、3個近紅外光波段頻道以及10個紅外光波段頻道。同時，可見光與近紅外/紅外光波段頻道之空間解析度，分別由原本的1公里與4公里提升至1公里至500公尺與2至1公里，最重要的部分則是，向日葵八號衛星可以提供每十分鐘一筆的超高時間解析度影像資料，因此透過其高時空解析與大範圍觀測之特性，更有利於提供日本、東亞及西太平洋之周邊天氣預報、觀測以及相關科學研究與應用。

此外，本研究亦使用CIMSS中NOAA/NESDIS Operational Cloud Processing System（CLAVR-x）套用多組其他衛星資料輔助所模擬出等級Level 2之H-8相關雲物理參數及地表種類產品，作為本研究反演過程中濾雲及資料篩選之輔助資料。

(二) MODIS-Terra/Aqua氣膠產品

本研究使用MODIS之Level 2 氣膠光學厚度產品，包括MOD/MYD04_3K及MOD/MYD04_L2，其中MOD/MYD04_3K為使用C6 DT所反演之3公里空間解析度氣膠產品，而MOD/MYD04_L2則使用C6 DB所反演之10公里空間解析度氣膠產品。

(三) AERONET地面觀測資料

本研究使用之AERONET測站分別為Beijing、Beijing-CAMS、Beijing-RADI和XiangHe共四個測站，但因為AERONET的測量時間與H-8衛星觀測時間並不完全重疊，所以吾等人利用H-8衛星的拍攝時間當作基準時間，若AERONET觀測時間與基準時間相差5分鐘內且最接近基準時間的話，則該筆AERONET資料就當作H-8所對應之AERONET觀測資料，若相差5分鐘內皆無AERONET觀測資料的話，則視為無相對應之觀測資料。

三、研究方法

(一)參考影像反射率資料庫之建立

一般而言，對比法中參考影像之選取，會挑選一幅乾淨影像（AOD約為0.1，由AERONET觀測得到）作為參考影像，但受限於能夠使用之乾淨影像張數以及參考影像與目標影像範圍大小不一等因素，因此本研究透過最小反射率技術（Minimum Reflectivity Technique, MRT）和雙向反射特性（Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF）趨勢線擬合校正，建立逐時參考影像反射率資料庫，以符合H-8多時影像應用於對比法上之需求。

最小反射率技術為假設一個月內地表不變且至少會有一天是乾淨大氣的情況，而這乾淨情況即為顯反射率最小的時候（不考慮陰影影響），因此每個像元經過最小反射率技術選取後，即可獲得整張逐時乾淨參考反射率影像，並且搭配地表雙向反射特性，透過趨勢線擬合校正，有效降低最小反射率技術選取後之反射率誤差產生。

(二)參考影像氣膠光學厚度資料庫之建立

根據文獻顯示，透過最小反射率技術求取之乾淨影像，大部分都會假設該影像之參考背景氣膠光學厚度在綠光波段下（AOD₅₅₀）為0.02至0.05不等，但吾等人認為這樣的假設並不適用於本研究區域，某些特

定區域如北京市地區之背景氣膠光學厚度，應該會因為當地的地形、氣候及人為污染等因素，造成整個月份，甚至是全年的氣膠光學厚度都大於0.05以上。因此，本研究收集MODIS-Terra/Aqua過去五年（2011-2015）C6 DB反演之10公里空間解析度產品（MOD/MYD04_L2），同樣參考最小反射率技術概念，選取這五年內不同波段之最小氣膠光學厚度，當作該波段下參考影像之背景氣膠光學厚度。

(三)離散係數法

假設衛星所觀測之地表為蘭氏面(Lambertian)，即代表該處地表具有均向反射特性，同時大氣結構為水平均勻分層，則衛星於大氣層頂(TOA)觀測到之輻射能量，分別為目標處、目標處環境場及大氣本身所造成之輻射貢獻量，如下式(1)：

$$\rho^* = \rho \frac{T(\vartheta_s)t_{dir}(\vartheta_v)}{1 - \rho_e S} + \rho_e \frac{T(\vartheta_s)t_{diff}(\vartheta_v)}{1 - \rho_e S} + \rho_a \quad (1)$$

其中 ρ^* 為衛星所觀測到之顯反射率； ρ_a 為未經地表之大氣反射率； ρ 為目標處之地表反射率； ρ_e 為目標處周圍環境場之平均反射率； t_{dir} 和 t_{diff} 分別為地表至衛星之直接穿透係數和散射穿透係數； $T(\vartheta_s)$ 為太陽至地表之總穿透係數； ϑ_s 和 ϑ_v 分別為太陽及衛星之天頂角； S 則為大氣球面反照率。

透過事先選定好之視窗，假設其範圍內大氣成分不隨時間及位置而改變，且目標處環境場貢獻量均相等的情況下，將公式(1)等號左右兩邊所有項取標準差(σ)，可以將等號右邊第二項及第三項之標準差視為零，推導出公式(2)：

$$\sigma(\rho^*) = \sigma(\rho) \frac{T(\vartheta_s)t_{dir}(\vartheta_v)}{1 - \rho_e S} \quad (2)$$

同時根據比爾定律， $t_{dir}(\vartheta_v) = \exp(-\tau/\cos\vartheta_v)$ ，將一幅乾淨參考影像和一幅受氣膠影響影像分別代入公式(2)，定義下標1代表乾淨參考影像、下標2代表受氣膠影響影像，設 $\sigma(\rho)$ 和 $T(\vartheta_s)$ 為定值不隨時間及氣膠濃度改變，且不考慮地表和大氣間多重交互反射作用，即 $\rho_e S$ 趨近於0，便可獲得公式(3)：

$$\frac{\sigma_1(\rho^*)}{\sigma_2(\rho^*)} = \frac{e^{-\tau_1/\cos\vartheta_{v1}}}{e^{-\tau_2/\cos\vartheta_{v2}}} \quad (3)$$

且因為衛星觀測天頂角 ϑ_{v1} 及 ϑ_{v2} 不隨時間變化，固定為 ϑ_v ，並將原本的標準差透過離散係數來取代，即推導出公式(4)：

$$\tau_2 - \tau_1 = \cos\vartheta_v \cdot \ln \left(\frac{\frac{\sigma_1(\rho^*)}{\rho_1}}{\frac{\sigma_2(\rho^*)}{\rho_2}} \right) \quad (4)$$

使用離散係數的好處在其為無因次量，且適用於比較不同資料水平變化量上之離散程度與平均數，因此在比較兩組因次不同或均值不同的數據時，離散係數可以將此兩組資料等價化，會較具有參考性。

(四)離散係數法公式驗證

對於前面小節所提到的離散係數法之公式(4)，吾等人認為此公式在推導過程中假設 $T(\vartheta_s)$ 為定值且不隨時間及氣膠濃度改變，是有過度簡化之疑慮，因此本研究採用地面測站AERONET的實測資料，檢驗是否可以使用已知時間點AERONET的AOD資料，搭配H-8衛星所觀測到的資料，透過公式推算出其他時間點測站的AOD，並利用相對應時間點之AERONET實測資料進行比對，以達公式驗證之目的。

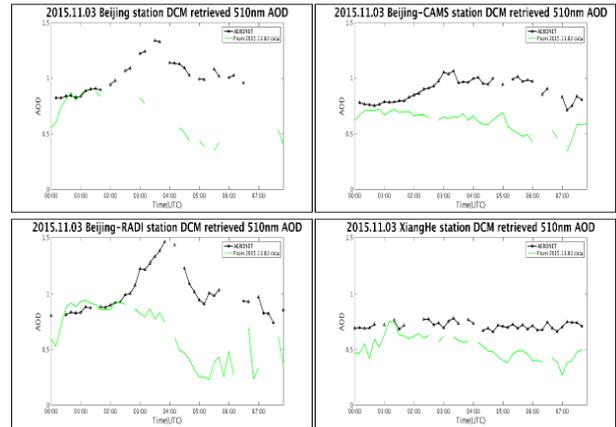


圖1、用離散係數法反演之各測站AOD時序圖。X軸為時間、Y軸為AOD，其中黑色實線為AERONET實測資料、綠色實線則為透過11/02資料當作參考依據所反演之AOD。

簡單來說，計算標準差之波段為綠光，並使用短波紅外光波段來計算視窗內平均反射率並標準化，而衛星資料上則採用相對應之兩天時間點，例如計算11/03 0450 UTC的AOD則使用11/02 0450 UTC的衛星資料及測站參考AOD來推算，以此類推，計算出全日每十分鐘一筆的AOD資料，但如果相對應之時間點，只要其中一天測站觀測資料顯示缺值或者衛星影像篩選上判斷為雲，則不進行反演。

由圖1不難發現到，雖然在接近中午時段可以反演出合理範圍內的AOD，但其餘時間點的AOD誤差

並不小，因此本研究認為對比法公式，事實上並無法適用於任意兩時間點上來做對比計算，也間接猜測 $T(\vartheta_s)$ 是會隨著時間不同而有所改變的，這部分需要進一步做修正及驗證。基於這樣的理由，吾等人進一步發現其相對誤差 (Relative Error) 與相位角 (Phase Angle) 會呈現明顯之負相關，如圖2所示：

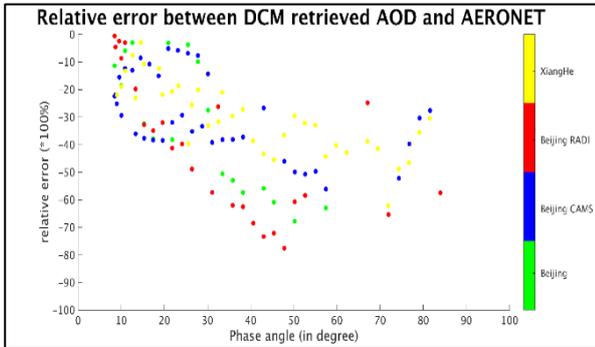


圖2、用離散係數法反演之AOD其相對誤差與相位角之散佈圖。X軸為相位角、Y軸為AOD相對誤差，顏色代表其所屬的測站。

當相位角小的時候，相對誤差也較小，主要是因為 AERONET 中的太陽輻射儀，在測量 AOD 的時候其接收太陽輻射的光程 (Optical Distance) 為太陽到儀器之最短距離，因此如果太陽輻射經地面目標物反射至衛星接收的路徑與太陽至目標物路徑平行的話，越能減少多出來路徑所造成計算 AOD 的誤差，而如何判別此兩路徑是否平行，主要是根據相位角的大小，當相位角大小越小，表示衛星與太陽間的立體夾角越小，足以代表符合太陽輻射儀觀測幾何上的機制，因此透過衛星資料推算出來的 AOD，才會越接近地面太陽輻射儀所實際量測的 AOD 大小。

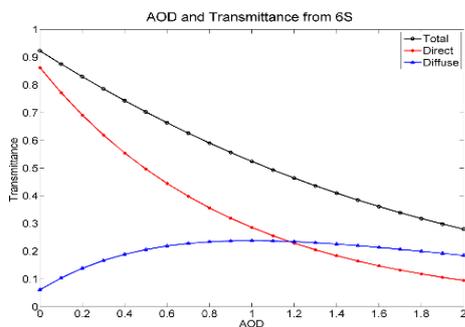


圖3、透過輻射傳送模式 (6SV4.1) 模擬在不同AOD情況下， $T(\vartheta_s)$ 、 $t_{dir}(\vartheta_s)$ 與 $t_{diff}(\vartheta_s)$ 之變化趨勢圖。X軸表示AOD大小、Y軸表示穿透率，其中 $T(\vartheta_s)$ 為 $t_{dir}(\vartheta_s)$ 與 $t_{diff}(\vartheta_s)$ 之總量。

除此之外，本研究亦透過輻射傳輸模式 (6SV4.1) 來模擬 $T(\vartheta_s)$ 是否會隨著 AOD 大小改變而有所變化，如圖 3 所示。假設太陽、衛星觀測幾何及其他參數固定不變的前提下，對於相同位置或像元而言，從圖 3 可以明顯發現到，輸入不同的 AOD 值會導致太陽至目標物間總穿透率有所改變，因此也推翻 Sifaki 等人當初在離散係數法公式推導過程中的假設，事實上 $T(\vartheta_s)$ 是會隨著太陽角度及氣膠光學厚度大小改變而不同，並非定值且無法忽略，因此本研究將會在下小節進行改良後的方法介紹，並修正 $T(\vartheta_s)$ 在對比法使用上的限制與假設。

(五)高時間解析影像序列疊代法修正與應用

對於前述的 $T(\vartheta_s)$ 會隨著氣膠濃度及時間改變而有所改變的定論，吾等人認為可以透過 H-8 其高時間解析度影像的特性，假設每十分鐘內的 $T(\vartheta_s)$ 相等較為合理，將事先尋找到的第一個時間點的影像設為參考影像，來推算下個時間點影像的氣膠光學厚度，並且再將下個時間點的影像視為下下個時間點影像的參考影像，來推算下下個影像的氣膠光學厚度，如此重複上述步驟，透過 H-8 資料在時間解析上的高連續性，便可推算出全日的氣膠光學厚度時序變化圖。

而如何找尋第一個參考影像時間點，本研究透過上小節所提到的氣膠光學厚度相對誤差與相位角之關係，將相位角最小的時間點設定為初始值的時間點，此步驟在計算初始參考的氣膠光學厚度時，為使用短波紅外光進行標準化之對比法來計算；相對於初始值之計算，其他透過時間序列疊代法 (Time series iterative algorithm, TSIA) 來計算之時間點影像，則採用相同於反演波段之波段來進行標準化，如圖 4 所示：

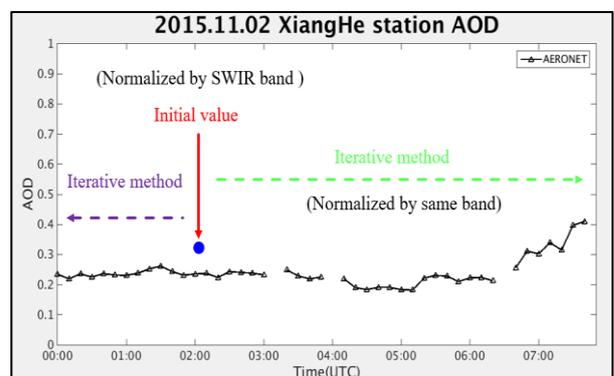


圖4、時間序列疊代法 (Time series iterative algorithm, TSIA) 示意圖。X軸為時間、Y軸為AOD，虛線箭頭表示此時間疊代法為雙方向性。

(六)最佳化視窗大小選擇

本研究分別先使用5×5、7×7、9×9、11×11及13×13的視窗大小，做初步的結果反演，並根據目標處在同一時間點不同視窗大小內的標準差，來篩選決定最佳化視窗大小，其概念源自於隨著視窗範圍逐漸擴大，按照理想情況下，所涵蓋到的地物變化理當越複雜，如果按照這樣的邏輯推測，其標準差也會隨著視窗變大而變大，但當視窗變大，標準差反而沒有增加，代表超過此視窗大小後，已失去地表結構變化之前提假設，而此臨界視窗大小即視為最佳視窗大小。

(七)研究架構

簡單來說，經由事先建立好之參考影像反射率及背景氣膠光學厚度資料庫，作為本研究方法中所使用的預設參考影像，並將 CLAVR-x 中所模擬出來的雲蔭、沙漠區域地表產品以及數值高程模型 (DEM) 所模擬出的海洋區域為參考依據，決定 H-8 原始影像 (目標影像) 欲反演之區域，同時過濾掉該影像中太陽天頂角大於 70° 可能造成嚴重反演誤差之地方。

接著使用離散係數法，藉由最小相位角之關係，找尋各像元相對應之初始時間，使用目標影像與預設參考影像計算出該時間點之氣膠光學厚度，並且進一步透過高時間解析序列疊代法，推算出全日目標影像中各位置之氣膠光學厚度大小，接著透過最佳化視窗大小選擇，決定足以代表本研究方法反演之 H-8 氣膠光學厚度產品，最後再配合 MODIS-Terra/Aqua 氣膠產品及 AERONET 地面觀測資料，作為本研究最終反演結果之品質驗證。

四、結果與討論

(一) H-8 AOD之反演與測站觀測資料

本研究在H-8 AOD反演結果與地面測站之觀測資料 (AERONET) 進行比較，藉以檢驗本研究所提出之方法之準確性。在與Beijing、Beijing-CAMS、Beijing-RADI與XiangHe測站AOD觀測結果之時序比對後顯示，H-8 AOD的反演具相當準確性，如圖5和圖6所示。

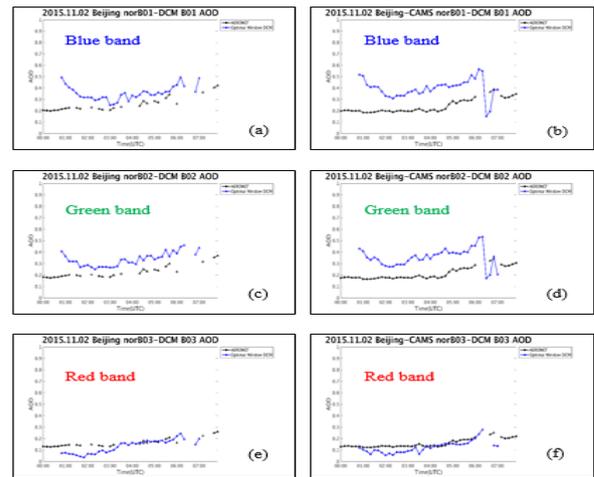


圖5、Beijing與Beijing-CAMS測站AOD反演結果與AERONET觀測之AOD時序比較圖。其中 (a) 和 (b) 為藍光波段、(c) 和 (d) 為綠光波段、(e) 和 (f) 為紅光波段。

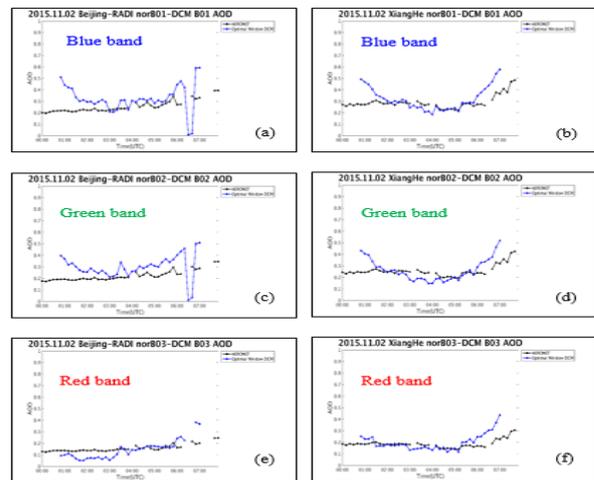


圖6、Beijing-RADI與XiangHe測站AOD反演結果與AERONET觀測之AOD時序比較圖。其中 (a) 和 (b) 為藍光波段、(c) 和 (d) 為綠光波段、(e) 和 (f) 為紅光波段。

(二) H-8與MODIS AOD空間分布之比較

除AOD值的反演外，本研究亦將探討H-8 AOD在空間分布之合理性，在與MODIS DT反演法得到之3公里空間解析之AOD產品 (包括MODIS Dart Target及Deep Blue方法) 比較後顯示，藉由離散係數法可反演出大範圍AOD空間分佈之資訊，如圖7所示。

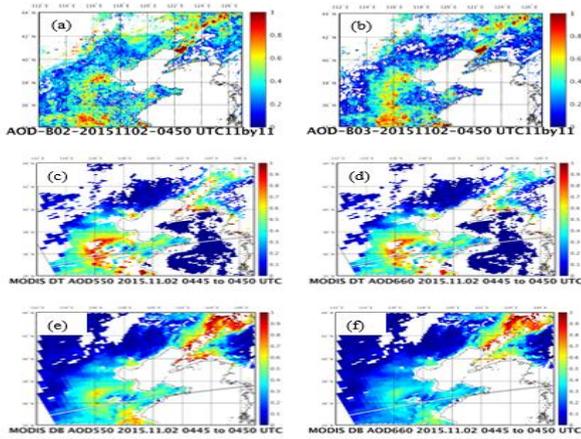


圖7、MODIS透過DT及DB反演與H-8套用本研究方法所反演之AOD空間分佈比較圖。其中(a)及(b)為H-8在綠光及紅光下反演之AOD結果，(c)及(d)為DT反演之相對應波段結果，(e)及(f)則為DB反演之相對應波段結果。

五、結論與未來展望

對於本研究所提出的對比法修正方法—高時間解析序列疊代對比法，從與各測站觀測資料比對分析來看，在不同時間點不同波段下，其相對誤差皆能維持在20%至50%之間，特別是紅光波段表現尤其亮眼，其相對誤差能夠達到國際上對於氣膠光學厚度反演之最大誤差容忍範圍的15%至20%，甚至有些時間點之相對誤差可以小於5%，代表此方法之修正，能夠有效透過衛星資料來掌握氣膠光學厚度在各測站之實際變化趨勢。然而，將MODIS氣膠光學厚度產品，與本方法反演之H-8氣膠光學厚度產品進行比對的話，會發現到使用本研究方法反演之結果，並未能百分之百有效掌握大範圍之氣膠濃度變化，只有在局部地區，例如北京市、山東半島和朝鮮半島能夠有效反演出與MODIS產品較為匹配之結果。

推測誤差來源可能來自於參考影像反射率資料庫建立之準確與否和太陽至地面目標物間之穿透率 $T(\vartheta_s)$ 其假設之適當性有關，前者吾等人認為當初在建立反射率資料庫的時候，僅使用最小反射率技術來篩選乾淨的反射率影像，但如果回顧氣膠對於不同程度明亮之物體所產生的模糊效應影響，事實上氣膠會讓衛星接收到低反射率之物體其反射率增加；相反地，接收到之高反射率物體其反射率減少，因此在選取最小反射率來當作乾淨影像時，可能只適用於低反射率地區，而高反射率地區則應當要選取濾完雲後最高或

者較高之反射率值，當作該地區之乾淨影像反射率較為妥當；後者則如果在氣膠濃度低的情況下，事實上可以假設 $T(\vartheta_s)$ 由 $t_{dir}(\vartheta_s)$ 來主導，如圖3所示，並且透過比爾定律 $t_{dir}(\vartheta_s) = \exp(-\tau/\cos\vartheta_s)$ ，將原本公式(4)改寫成公式(5)：

$$\tau_2 X_2 - \tau_1 X_1 = \cos\vartheta_v \cdot \ln\left(\frac{\sigma_1(\rho^*)}{\frac{\rho_1}{\sigma_2(\rho^*)}}\right) \quad (5)$$

其中 $X = \sec\theta_s + \sec\theta_v$ ，可以發現到透過公式(5)，是可以有效改善低濃度氣膠情況下原本結果之高估情形，如圖8所示。

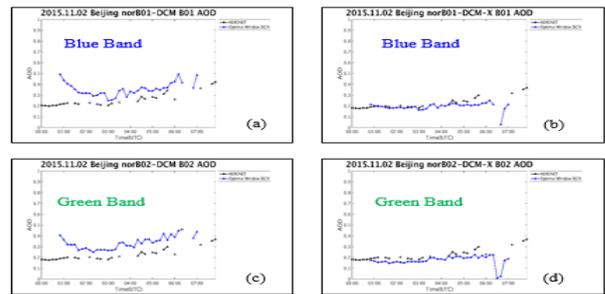


圖8、Beijing 測站套用 X 修正前、後與 AERONET 觀測之 AOD 時序比較圖。其中(a)及(c)分別為修正前反演藍光及綠光之 AOD 時序比較圖，同時(b)及(d)為其相對應加入 X 值修正後之 AOD 時序比較圖。

整體而言，如果忽略上述所提到的不確定性，本研究提供了一個全新的概念，將原本應用在高空間解析之繞極衛星資料反演方法，套用於空間解析較差、時間解析極高的地球同步衛星資料上，透過其每十分鐘一筆且大範圍觀測的資料特性，有效掌握各地區氣膠濃度隨時間變化之趨勢，期許未來能夠進一步透過氣膠垂直消光係數剖線的變化，求取近地面懸浮微粒(PM_{2.5})濃度，將是本研究未來最重要的課題之一。

六、參考文獻

- 林唐煌, 劉振榮, & 陳哲俊. (1998). 應用 SPOT 衛星資料求取大氣氣溶膠光學厚度. 航測及遙測學刊, 3 (4), 1-14.
- Retalis, A., & Sifakis, N. (2010). Urban aerosol mapping over Athens using the differential textural analysis (DTA) algorithm on MERIS-ENVISAT data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(1), 17-25.
- Sifakis, N., & Deschamps, P. Y. (1992). Mapping of air pollution using SPOT satellite data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58, 1433-1433.