

NDVI 在監測亞洲沙塵暴之應用

黃世任 陳勇志

國立台灣海洋大學 海洋環境資訊系

摘要

本研究主要是利用 MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) 陸地反射率與植被指數產品監測亞洲沙塵暴。鑑於 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 對大氣氣溶膠 (Aerosol) 敏感之特性，本研究提出 NDVI 相對差量百分比 (NDVI Relative Difference Percentage, NDVI RDP) 監測沙塵暴。本研究在沙塵暴影響期間，先對衛星資料作一系列的品質篩選，然後計算出每日的 NDVI RDP，再用鄰近 AERONET (Aerosol Robotic Network) 測站的太陽光度計 (sunphotometer) 所量得在 440nm 之氣溶膠光學厚度 (Aerosol Optical Thickness at 440nm, AOT440) 來驗證 NDVI RDP 的可行性。經研究結果顯示，在植被較茂密的地區 ($0.5 \leq \text{NDVI} \leq 0.7$)，NDVI RDP 與 AOT440 之間具高度正相關 ($0.54 \leq R^2 \leq 0.8$)。因此 NDVI RDP 在植被較茂密的地區 ($0.5 \leq \text{NDVI} \leq 0.7$) 可用來監測沙塵暴。

關鍵字：MODIS, NDVI, NDVI RDP, AOT440

一、前言

植物的分佈在陸地面積佔有很大的比例，陸地表面的植物通常是遙感觀測的第一個目標，也是遙測影像反映的最直接訊息。而遙測訊息的取得過程是指目標物所反射的電磁波，通過大氣後再傳輸至感測器的過程。但由於目標物所反射的電磁波在大氣中傳輸時受到大氣分子與氣溶膠 (Aerosol) 散射及水汽與臭氧的吸收等因素的影響。若再加上地表各向異性與葉冠背景 (canopy background) (如土壤、潮濕地面、雪、枯葉、表面粗糙度等) 等因素之綜合影響下，要從衛星接收到的電磁波訊號去提取真實的植物活動之訊息相當不易。故本研究針對衛星所反演的正規化差異植被指數 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)，依其受到大氣氣溶膠影響的特性，提出新方法對環境災害進行監測。

Lillsand 和 Kiefer 在 1994 年指出，健康的

綠色植物之光譜反射特性主要取決於葉子中的葉綠素。在光合作用下，健康綠色植物的葉子在紅光波段 ($0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$) 因受到葉綠素的吸收而有強烈地吸收，故紅光反射率較低；而在近紅外光波段 ($0.7 \sim 1.3 \mu\text{m}$) 因葉綠素吸收很少，故近紅外光波段會形成高反射率。若植物覆蓋程度愈大時，其紅光與近紅外光的反射率值的對比 (或差值) 會增加，反之，其紅光與近紅外光的反射率值的對比 (或差值) 會減小。故可利用紅光波段與近紅外波段的反射率之比值、差值與線性組合等多種組合來代表健康綠色植物的覆蓋程度。故 Deering 在 1978 年提出正規化差異植被指數 (NDVI)，其定義為近紅外光反射率 (ρ_{NIR}) 與紅光反射率 (ρ_{Red}) 之差值再除以近紅外光反射率與紅光反射率之和，其值域介於 1 與 -1 之間。NDVI 公式如下：

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}} \dots \dots \dots (1)$$

在植物遙感中，NDVI 的應用最為廣泛。其原因在於 NDVI 與葉面積指數 (Leaf Area

Index, LAI)、綠色生物量、植被覆蓋度、光合作用等植被參數有關。Asrar 等 (1992) 與 Walter-Shea 等 (1997) 研究均指出, 接近星下點的 NVDI 與吸收光合作用有效輻射比 (Fraction of absorbed photosynthetically active radiation, FAPAR) 之關係幾乎呈線性相關, 而與 LAI 的關係呈自然指數相關。NDVI 在生長季中的時間積分對基礎生產力 (primary productivity)、半乾旱區的降雨量及隨季節(或緯度)變化的二氧化碳濃度均很敏感(Tucker 和 Sellers, 1986; Nicholson 等, 1990; Tucker 等, 1986)。尤其在數種典型的大尺度覆蓋區, 在 NDVI 影像上, 能有效突顯植被區的訊息。因此 NDVI 被認為是監測小區域或全球性植被和生態環境變化的有效指標(Prince 和 Tucker, 1986; Townsend 和 Justice, 1986)。NDVI 經正規化處理後, 使單頻道的儀器校準 (calibration) 誤差之影響從 10%~30% 降到對 NDVI 的 0%~6%, 因此 NDVI 可增強植被的訊息(Holben 等, 1990)。就 NDVI 的值域之特徵而言, 趙 (2003) 指出, 由於雲、水與雪在可見光波段比近紅外波段有較高的反射作用, 因此 NDVI 值為負值。岩石與裸土在可見光波段比近紅外波段有近似的反射強度, 因此 NDVI 值很接近零。在有植被覆蓋的區域, NDVI 為正值, 且隨植被覆蓋度的增加而增大。

對衛星資料所反演的正規化差異植被指數 (NDVI) 而言, 從 Miura 等 (1998) 研究結果知, 當大氣氣溶膠增加時, 其會降低紅光和近紅外反射信號的對比度(參見圖 1), 導致 NDVI 值減小。其原因是紅光波段之反射率由於散射作用, 使其在上行路徑中, 受到的大氣貢獻而增強, 然而近紅外光波段的反射率雖有小幅增加, 但變量不大。這個淨效應使 NDVI 值降低, 也就是說地表真實植被量被低估。NDVI 值的衰減與大氣氣溶膠含量有關, 大氣愈混濁, 衰減程度愈大。在其他研究(Ferreira 等, 2003; Myneni 和

Asrar, 1994; Miura 等, 2001) 中也指出 NDVI 對大氣氣溶膠的影響很敏感。故本研究將利用 NDVI 受大氣氣溶膠影響而衰減之特性, 提出 NDVI 相對差量百分比 (NDVI Relative Difference Percentage, NDVI RDP) 監測沙塵暴。

二、資料獲得來源與收集時間

在資料獲得來源部分主要分成兩大項, 第一項是採用美國航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的 GES (Goddard Earth Science) 資料分送中心之 Terra 衛星酬載之中解析度成像光譜儀(Moderate resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 250m 解析度之每日反射率 (包含紅光與近紅外光之反射率) 產品及 16 日複合 NDVI 產品。

其資料雖然有經過大氣訂正(訂正項目包括水汽、二氧化碳與臭氧之吸收、卷雲影響、地表各向異性之影響、Rayleigh 散射與氣溶膠散射)(Vermote 等, 1997; Vermote 和 Vermeulen, 1999), 但該產品在大氣訂正的過程中, 氣溶膠的輸入量來自 MODIS 自身所反演的氣溶膠產品且該氣溶膠產品的解析度 (10km) 比 MODIS 的植被指數產品之解析度 (250m) 較粗糙。在此情況下, 既使作了大氣訂正, 其仍然有殘餘的氣溶膠影響, 特別是氣溶膠污染很嚴重時(如沙塵暴等)(Huets 等, 1999)。所以本文將針對受沙塵暴影響期間, 篩選出品質較佳的衛星資料, 然後透過本研究提出的 NDVI RDP, 儘可能地從衛星資料中將殘餘的氣溶膠訊息提取出來, 用來指示該時段大氣受污染之情形, 並期望此結果有利於氣溶膠污染之監測。

第二項是全球氣溶膠地面遙測觀測網 AERONET (Aerosol Robotic Network) 測站的太陽光度計 (sunphotometer) 所量得在 440nm 之氣溶膠光學厚度 (Aerosol Optical

Thickness at 440nm, AOT440)。其資料下載網址為 <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/index.html>

在資料收集時間的部分, 依據台灣環保署沙塵暴歷史資料庫收集屬於沙塵暴影響的時間, 然後找出在沙塵暴影響時間且衛星影像為晴空的條件下, 同時 AERONET 測站資料時間必須有超過 70% 觀測天數有值, 才給予選擇。主要有三個 AERONET 測站, 分別為南韓的濟州島 (Che-Ju) 資料時間 2001/4/5~2001/4/15 及 2003/3/19~2003/3/28 與安眠島 (Anmyon) 資料時間 2001/4/5~2001/4/15 以及中國的內蒙 (Inner Mongolia) 資料時間 2001/4/27-2001/5/6, 本研究取前後連續五或六日以上來觀察其從正常時間至沙塵暴發生時的連續趨勢。

三、研究方法

因 NDVI 強烈地受到大氣氣溶膠的影響, 若氣溶膠含量愈高時, 其衰減程度愈大, 故本研究提出 NDVI 的相對差量百分比 (NDVI RDP) 之方法來監測沙塵暴。NDVI RDP 公式如下:

$$\text{NDVI RDP (\%)} = \frac{(\text{NDVI}_{16\text{-day composite}} - \text{NDVI}_{\text{daily}})}{\text{NDVI}_{16\text{-day composite}}} \times 100\% \dots\dots(2)$$

其中 $\text{NDVI}_{16\text{-day composite}}$ 為 MODIS 16 日複合之 NDVI 值, $\text{NDVI}_{\text{daily}}$ 為每日的 NDVI 值。

(2) 式的觀念是將 MODIS 16 日複合的 NDVI 視為地面真實的植被值, 在沙塵暴影響的時間(大量氣溶膠污染的時間), 取每日的 NDVI 值與 16 日複合的 NDVI 值, 然後求出每日的 NDVI 相對差量百分比。本研究依 MODIS 的反射率與 NDVI 資料的物理特性, 設計出資料品質控制流程, 以擷取出可用度高的每日 NDVI 像元且確保 16 日複合的 NDVI 像元無沙塵暴時間參與複合。然後計算出每日的 NDVI RDP, 最後與 AERONET 測站的太陽光度計所量得在 440nm 之氣溶膠光學厚度(AOT440)比較, 以驗證 NDVI RDP

的可行性。

由於 MODIS 的氣溶膠產品之像元解析度為 $10 \times 10 \text{ km}^2$, 所以在本研究中取 AERONET 測站(如韓國的濟州島、安眠島與中國的內蒙)周圍 $10 \times 10 \text{ km}^2$ 範圍內之所有像元, 並將 16 日複合之 NDVI 分成十種背景值域 ($\text{NDVI} = 0 \sim 0.1, 0.1 \sim 0.2, \dots, 0.9 \sim 1$), 最後取出相同背景值域之像元之 NDVI RDP 與 AERONET 測站之 AOT440 資料作相關性比較。

四、結果與討論

(一) 不同背景值域與 AOT440 的相關性

經過第一至第六個步驟之篩選與處理後, 將 AERONET 測站附近的不同 NDVI 背景值域之 NDVI RDP 與 AOT440 實測資料計算其相關性(如圖 2)。此圖可明顯地發現, 整體而言, 在未知地面植物分佈型態的情況下, 若採用背景值(16 日複合 NDVI 值)介於 0.5~0.7 會得到較佳的線性正相關($0.67 \leq R^2 \leq 0.86$), 但在 NDVI 小於 0.4 以下的測站(如韓國-安眠島與中國-內蒙測站)相關性不佳 ($0 \leq R^2 \leq 0.25$), 此結果表示在植被較茂密的地區對大氣氣溶膠較敏感, 但在低植被區可能因葉冠背景(如裸土等)的影響, 故對大氣氣溶膠不敏感。

(二) 相同位置不同時間之 NDVI RDP 與 AOT440 的相關性

由 Miura 等 (1998) 的研究結果知, 在相同的氣溶膠光學厚度下, 因不同的植物分佈型態, 使其對大氣的敏感度會有差異。所以必須固定位置(表示同一種植物分佈型態)探討其不同時間之變化, 則在定量上的分析較具有意義。因此本研究將以濟州島測站 (AERONET 測站) 為例, 在 2001 年 4 月上旬(4 月 5 日~4 月 15 日) 及 2003 年下旬(3 月 19 日~3 月 28 日)

的兩個時段，於大氣敏感度較佳的背景區域 (16 日複合 NDVI=0.5~0.7) 且地理位置相同的條件下，而且在這兩個時段均有四日以上的資料，來探討在不同時間的 NDVI RDP 與 AOT440 實測資料之相關性比較。

在濟州島測站 (AERONET 測站) 附近 10x10km² 範圍中，通過篩選後，最後符合條件的像元位置共有二十個。在所有相鄰區域中，本研究僅取一個相鄰區域作代表，其中分別以代號 C1、C2 與 C3 標示，而在其他區域中，若有相鄰或不相鄰區域則取一個位置來作代表，並分別以代號 C4、C5、……、C10 標示，依上述之標示結果，本研究總共可取出十個位置 (如圖 3) 來分析。最後將此十個位置的每日之 NDVI RDP 與濟州島測站 (AERONET 測站) 之 AOT440 作相關性比較，如圖 4 與圖 5 所示。

圖 4 為 2001 年 4 月上旬受沙塵暴影響的前後期間，於濟州測站附近 C1 至 C10 區域的 NDVI RDP 與 AOT440 的關係圖。圖中為接近星下點，且排除陰影與殘雲影響下的晴空資料結果。顯示在每個區域上，NDVI RDP 均隨著 AOT440 值的增加而增大。尤其是當 AOT440 大於 0.5 時，則這趨勢更為明顯，而在 AOT440 大於 0.75 時，當天的 NDVI RDP 值，在所有區域均大於 90%。

圖 5 同圖 4，但沙塵暴影響時間為 2003 年 3 月下旬，在 2003 年 3 月 22 日至 3 月 25 日期間，顯示 AOT440 的值有明顯升高的現象，這表示濟州測站在這段期間受到沙塵暴的影響。圖中也顯示出，當 AOT440 升高時，測站附近各區域的 NDVI RDP 也隨之增大。同樣地，當 AOT440 大於 0.75 時，各區域的當天 NDVI RDP 值也大於 90%。

整體而言，於相同位置的條件下，在沙

塵暴發生期間，其 C1 至 C10 區的 NDVI RDP 與 AOT440 的相關性(R²)在 0.54 到 0.8 之間。從本研究的結果顯示，在相同位置 (代表相同植物型態分佈) 不同時間的條件下，當 AOT440 大於 0.75 以上時，其 C1 至 C10 區的 NDVI RDP 值皆大於 90%，若 AOT440 值再更高時，則 NDVI RDP 有趨於飽和之情形，此現象可能來自 MODIS 氣溶膠產品的空間解析度 (10km) 比 NDVI 產品的解析度 (250m) 低，所以在 250m 解析度的 NDVI 產品仍有殘存氣溶膠之影響 (Huete 等, 1999)。在大部分的情況下，當 AOT440 小於 0.65 以下時，其 C1 至 C10 區的 NDVI RDP 值皆低於 35% 且變化較不規則。

從 AERONET 測站之歷史資料得知，在沙塵暴發生期間，其 AOT440 值通常大於 0.7 以上，而正常時間 (晴空時間)，其 AOT440 值皆小於 0.4 以下，故可依此特性去使用 NDVI RDP 來判斷正常時間與受大量氣溶膠污染時間 (如沙塵暴影響時間等)。舉例來說，若 NDVI RDP 值大於 90% 以上時，則表示為大量氣溶膠污染的時間，若 NDVI RDP 小於 35% 時，則表示為正常時間之情形。

而在相鄰位置 (C1 至 C3 區) 中，除了 NDVI RDP 與 AOT440 的相關程度(R² 值很接近)很相近外，而且在相同的大氣條件 (相同的 AOT440 值) 下，其 NDVI RDP 值幾乎相同 (參見圖 4,5)，此結果表示在相鄰位置可能具有相同的植物分佈型態。

本研究可歸結兩個重要結果，第一，雖然通過一連串嚴格地品質控之制篩選標準，結果可用的像元位置並不多，但這些可用的像元位置仍可作為監測沙塵暴測站的延伸。第二，本研究提出的 NDVI RDP，在植被較茂密的地區 (0.5 ≤ 16 日複合 NDVI ≤ 0.7)，可用來監測極端性天氣 (如沙塵暴等)。

五、結論

本研究採用美國 NASA 的 GES 資料分送中心之 MODIS 250m 解析度之反射率產品及 16 日複合植被指數產品。並經過品質控制篩選流程，選出可用度最佳等級的像元，在沙塵暴發生期間，計算出每日的 NDVI RDP，再與 AOT440 作相關性比較，以驗證其可行性。

經研究得到三個結果，第一個結果，整體而言，在未知地面植物分佈型態的情況下，若採用背景值 (16 日複合 NDVI 值) 介於 0.5~0.7 會得到線性的高度正相關 (0.67 ≤ R² ≤ 0.86)，而當背景值小於 0.4 以下的測站 (如韓國-安眠島(或濟州島)與中國-內蒙) 相關性低 (0 ≤ R² ≤ 0.25)。第二個結果，在相同位置 (代表相同的植物分佈型態) 不同時間之條件下，NDVI RDP 與 AOT440 仍具高度相關 (R² ≤ 0.54)，並且當 AOT440 值大於 0.75 以上時，NDVI RDP 值在 90% 以上，若 AOT440 值更高時，NDVI RDP 值有趨於飽和的現象。在大部分情況下，當 AOT440 值小於 0.65 以下時，NDVI RDP 值皆低於 35% 且變化較不規則。故可依此特性使用 NDVI RDP 值來判斷正常時間與受大量氣溶膠污染時間 (如沙塵暴影響時間等)。第三個結果，在分析過程中發現，在相同的大氣條件 (相同的 AOT440 值) 下，其 NDVI RDP 值幾乎相同，表示相鄰位置可能具有相同型態植物分佈。

總結上述三項結果知，利用本研究所提出 NDVI RDP，在植被較茂密的地區 (0.5 ≤ NDVI ≤ 0.7) 可監測沙塵暴。另外，在本研究過程中發現，雖然通過一連串嚴格地品質控制篩選標準，結果可用的像元位置並不多，但這些可用的像元位置仍可作為監測沙塵暴測站的延伸。

六、誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會研究

計畫 (NSC93-2611-M019-012 及 NSC94-2611-M-019-014) 支持得以順利完成。另外感謝美國航空暨太空總署 (NASA) 的 GES (Goddard Earth Science) 資料分送中心提供的 MODIS 資料，謹此誌謝。

七、參考文獻

- 趙英時, 2003: “遙感應用分析原理與方法”, 科學出版社, 第 374 頁。
- Asrar, G., Myneni, R. B., and Choudhury, B. J. 1992: “Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: a modeling study” *Remote Sens. Environ.*, 41, 85-103.
- Deering, D. W., 1978: “Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors”, Ph. D. Dissertation, Texas A & M University, College Station, TX, 338.
- Ferreira, L. G., Yoshioka, H., Huete A. R., and Sano, E. E., 2003: “Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the large-scale biosphere-atmosphere experiment in Amazo^ˆnia (LBA)”, *Remote Sens. Environ.*, 87, 534-550.
- Holben, B. N., Kaufman, Y. J., and Kendall, J. D., 1990: “NOAA-11 AVHRR visible and near-IR inflight calibration bands”, *Int. J. Remote Sensing*, 11, 1511-1519.
- Huete A. R., Justice C., and van Leeuwen, W., 1999: “MODIS vegetation index (MOD13), EOS MODIS algorithm theoretical basis document”, Version 3.
- Lillesand, T. M., and Kiefer, R. W., 1994: “Remote sensing and image interpretation”, John Wiley & Sons, 18-19.

Miura, T., Huete, A. R., Yoshioka, H., and Holben, B. N., 2001: "An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction", *Remote Sens. Environ.*, 78, 284-298.

Myneni, R. B. and Asrar, G., 1994: "Atmospheric effects and spectral vegetation indices", *Remote Sens. Environ.*, 47, 390-402.

Miura T., Huete A. R., van Leeuwen W. J. D., and Didan, K., 1998: "Vegetation detection through smoke-filled AVIRIS images: An assessment using MODIS band pass", *J. Geophys. Res.*, 103(D24), 32001-32011.

Nicholson, S. E., Davenport, M. L., and Malo, A. D., 1990: "A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and east Africa, using NDVI from NOAA AVHRR", *Climate Change*, 17, 209-214.

Princed, S. D., and Tucker, C. J., 1986: "Satellite remote sensing of rangelands in Botswana II: NOAA AVHRR and herbaceous vegetation", *Int. J. Remote Sensing*, 7, 1555-1570.

Townsend J. R. G., and Justice, C. O., 1986: "Analysis of the dynamics of African vegetation using the NDVI", *Int. J. Remote Sensing*, 7, 1435-1446.

Tucker, C. J., Fung, I. Y., Keeling, C. D., and Gammon R. H., 1986: "Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite derived vegetation index", *Nature*, 319, 195-199.

Tucker, C. J., and Sellers, P. J., 1986: "Satellite remote sensing of primary productivity", *Int. J. Remote Sensing*, 7, 1395-1416.

Vermote, E. F., Saleous, C. O., Justice, Y. J., Privette, J. L., Remer, L., Roger, J. C., and Tanre, D., 1997: "Atmospheric correction of

visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational, algorithm and validation", *J. Geophys. Res.*, 102(14), 17131-17141.

Vermote, E. F., and Vermeulen, A., 1999: "MODIS atmospheric correction algorithm: spectral reflectance (MOD09). Algorithm technical background document", Version 4.0.

Walter-Shea, E. A., Privette, J., Cornell, D., Mesarch, M. A., and Hays C. J., 1997: "Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in Alfalfa", *Remote Sens. Environ.*, 61, 162-17.

淨效應：NDVI值被低估

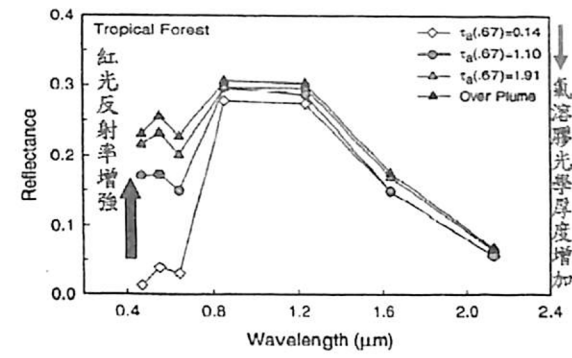


圖 1 MODIS 前五個頻道之反射率隨著光學厚度增加之情形。圖中 $\tau_a(0.67)$ 表示 AERONET 測站所量得在 0.67 μ m 的氣溶膠光學厚度 (Miura 等, 1998)。

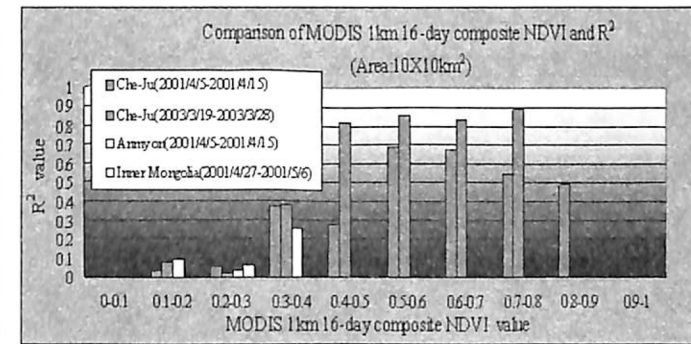


圖 2：不同背景值域與 AOT440 之相關性比較。Inner Mongolia 與 Anmyon 測站因其背景值域皆小於 0.4 故背景值域大於 0.4 時無資料。

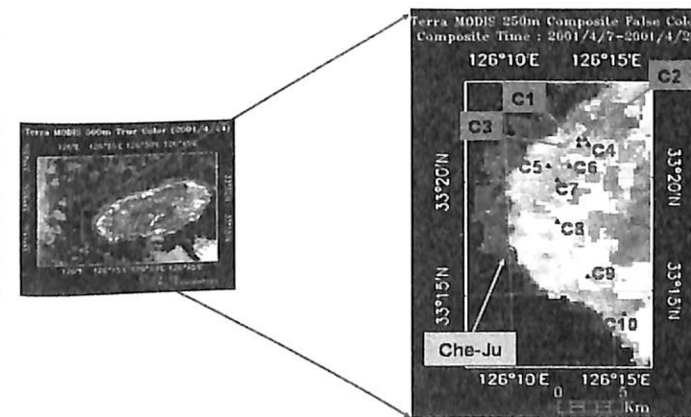


圖 3：在濟州島測站附近代號為 C1 至 C10 區域之位置。左圖為濟州島全島的真色影像 (True color image)，右圖為左圖區域放大之 16 日複合假色影像 (False color image)。

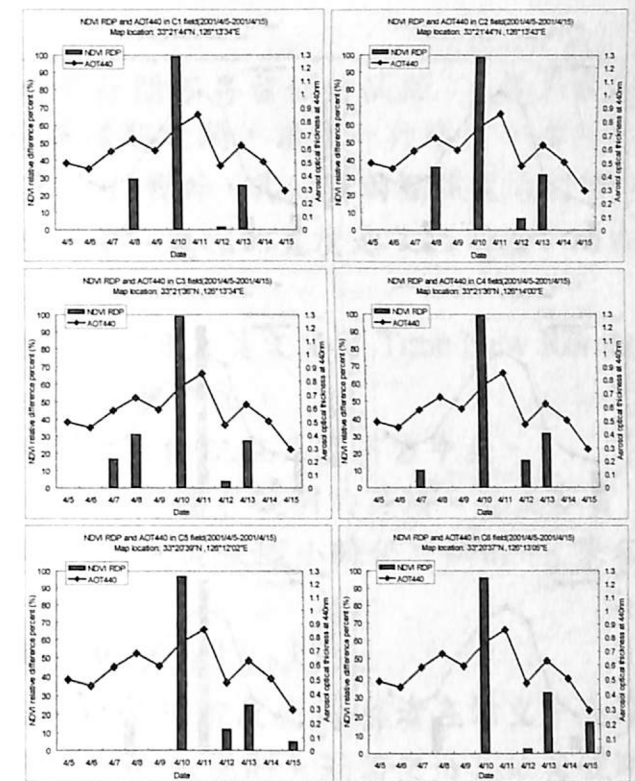


圖 4: 濟州島測站之 AOT440 與附近 C1 至 C10 區域之 NDVI RDP 關係圖，資料時間：2001/4/5-2001/4/15，沙塵暴影響時間：2001/4/7-2001/4/10。

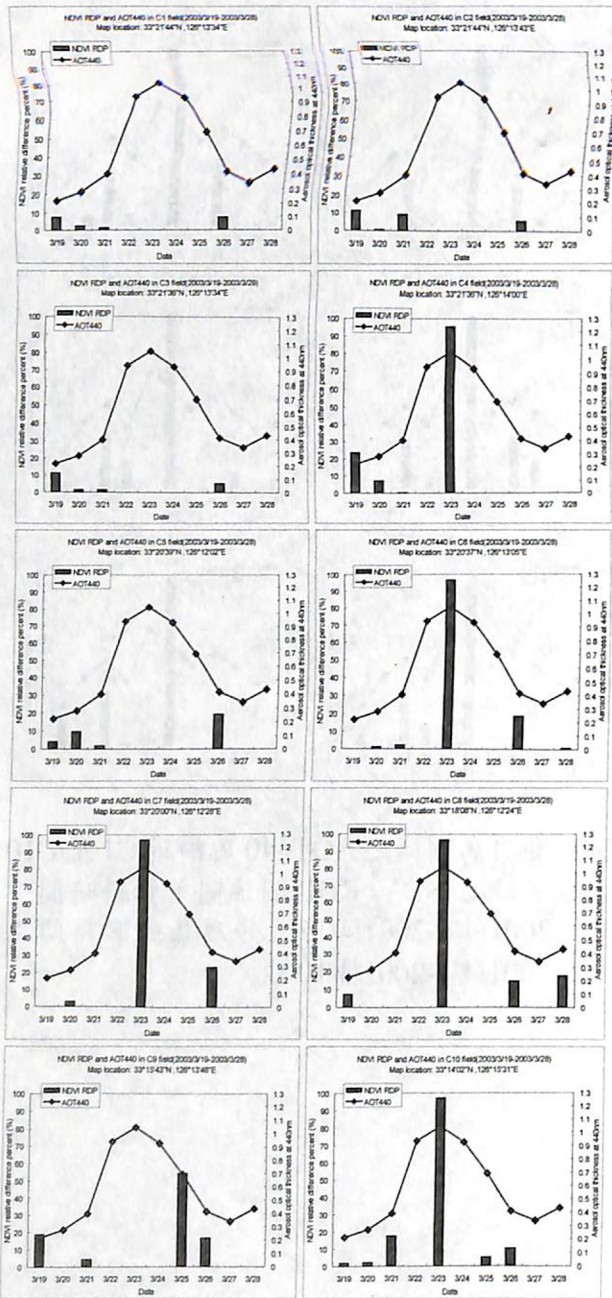


圖 5：濟州島測站之 AOT440 與附近 C1 至 C10 區域之 NDVI RDP 關係圖，資料時間：2003/3/19-2003/3/28，沙塵暴影響時間：2003/3/24-2003/3/26。