

## 福衛二號影像之大氣輻射校正—輻射控制區的應用

### Atmospheric Correction of Formosat-II Imagery – Application of Radiometric Control Areas

國立台灣大學  
森林環境暨資源學系  
博士班研究生

**鄧淑萍**

Shu-Ping Teng

國立台灣大學  
生物環境系統工程學系  
博士後研究員

**蘇元風**

Yuan-Fong Su

國立台灣大學  
森林環境暨資源學系  
教授

**羅漢強**

Hann-Chung Lo

銘傳大學  
觀光系  
教授

**陳永寬**

Yeong-Kuan Chen

國立台灣大學  
生物環境系統工程學系  
教授

**鄭克聲\***

Ke-Sheng Cheng

#### 摘 要

衛星遙測於地表資源監測上是相當具有潛力且快速發展中的工具之一，尤其福衛二號影像具有八公尺空間解析度，被廣泛應用於農林業與水資源監測等各領域。大氣層對太陽入輻射產生散射作用而被衛星所接收之輻射量(或稱為路徑輻射量)，與地表物體反射特性無關，因此欲使用衛星影像準確推估地表特性，必須適當地移除路徑輻射量，對於後續應用於農業與水資源領域而言相當重要。本文提出基於輻射控制區中實際量測之反射率估算路徑輻射量的流程，並與傳統上常用方法比較，分別是暗體辨識法、多波段迴歸法與共變矩陣法等。研究中顯示柏油鋪面適合作為輻射控制區。四種方法的結果顯示，暗體辨識法與共變矩陣法容易高估路徑輻射量，而多波段迴歸法雖然得到與本文所提方法相似的結果，但是由於偏低的判定係數使得迴歸模式的可靠度較低。綜合三個間接評估指標的結果，本文所提出之基於輻射控制區的方法均優於其他傳統方法。

**關鍵詞：**大氣輻射校正，路徑輻射量，輻射控制區，福衛二號影像。

\*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系教授，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段一號，rslab@ntu.edu.tw

## ABSTRACT

Remote sensing has been extensively applied to Earth resource monitoring and management. However, radiances received at satellite sensors include not only radiances reflected from the target on land surface but also radiances scattered by particles in the atmosphere, i.e. the path radiance. Path radiance is independent of the target characteristics and its presence induces noise to satellite images. In this paper, an algorithm of path radiance estimation based on measurements of surface reflectance at radiometric control areas (RCA) is proposed. Path radiance estimates of the proposed RCA-based method were compared against estimates of other methods including the dark object subtraction method, multi-band regression technique, and the covariance matrix method. The RCA-based method is superior to other methods based on three assessment criteria. In this research, paved surface which could be easily identified in most images was found to be a good choice for radiometric control areas. The dark object subtraction method and the covariance matrix method tend to overestimate path radiance. Although in our study the multi-band regression technique seems to perform as well as the RCA-based method, its estimates may be less reliable.

**Keywords:** Atmospheric correction, Path radiance, Radiometric control area, Formosat-II images.

## 一、前言

衛星遙測技術於近幾十年快速地發展，其具有綜觀全覽、短期重複且穩定觀測的能力，在農業、林業與水資源領域的應用逐漸受到重視，例如使用遙測影像於水稻田產量推估(Quarmby *et al.*, 1993; Moran *et al.*, 1997)、山坡地崩塌地辨識與變遷偵測(Ridds and Liu, 1998; Cheng *et al.*, 2004; Teng *et al.*, 2008; 張世駿等, 2006)、水庫或埤塘水質監測等(Cheng and Lei, 2001; Su *et al.*, 2008; 蘇元風等, 2009)、蒸發散量的推估(Bastiaanssen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2007)等等。遙測技術於各種地表資源監測的應用上，最重要的是準確的推估地表物體的特性，然而衛星所接收的輻射量除了地表反射的輻射量外，仍有一部分來自大氣散射所造成的輻射量，或稱之為路徑輻射量(path radiance)，由於路徑輻射量無法反映出地表資訊，因此適當地移除路徑輻射量才能推估實際地表特性，對於後續於農林業地表資源監測領域的應用而言相當重要。

路徑輻射量與大氣中水氣與懸浮微粒的組成有關，而大氣組成隨著時間不停變動，欲精確估計每日的路徑輻射量變動需要許多的觀測資料，而這些觀測資料在大部分的遙測應用中並不容易取得或根本沒有量測。過去數十年中，學者們提出許多路徑輻射量估計的方法(Slater, 1980; Kaufman and Sendra, 1988; Richter, 1996; Schott, 1997; Rees, 2005; Hadjimitsis, *et al.*, 2009)，其中暗體辨識法(Dark object subtraction, DOS)可能是最為廣泛應用的大氣校正方法之一(Schott, 1997; Cheng and Lei, 2001)，DOS的基本概念是找出各波段影像中最暗的物體，並將此網格的灰階值轉換為輻射量，即為路徑輻射量，若研究區域中存在反射率接近於零的物體，則DOS可適當推估路徑輻射量。然而，實際應用中絕大多數物體在可見光波段的反射率並不接近於零，因此DOS方法往往容易高估可見光波段的路徑輻射量(Schott, 1997)。為解決DOS的缺點，學者提出多波段迴歸法(Chavez, 1975; Porter, 1984; Kaufman *et al.*, 1997; Schott, 1997)，其假設某一波段的路

徑輻射量可被適當估計，其他波段的路徑輻射量則以迴歸模式推估之。Switzer *et al.* (1981)提出共變矩陣法(Covariance Matrix Method, CMM)，可同時推估出各波段的路徑輻射量，因此可視為多波段迴歸法的延伸，但其應用上仍有些差異將在後面章節介紹。

前述路徑輻射量估計的方法，均假設大氣組成在影像範圍內為均勻分布，即影像中的每一網格的路徑輻射量均相同。此外，這些方法並未採用任何量測的大氣或地表資訊，僅由影像本身的資訊來推估路徑輻射量，然而如可取得適當的觀測資訊，可提高推估路徑輻射量的準確度。本研究提出一大氣校正流程，在輻射控制區內的實測資料輔助下，同樣假設大氣組成於空間中均勻分布，忽略氣膠於小研究區域的空間變異，推估路徑輻射量並與其他三種大氣校正方法比較。

## 二、輻射傳輸模式

衛星遙測資料於地球資源監測上，感測地表資訊時主要的光源為太陽輻射，太陽輻射進入大氣層頂後經過大氣層並與地表作用後抵達衛星感測器，假設地表物體於各方向之反射特性均相同(即為蘭氏面)，抵達衛星感測器的太陽輻射量( $L_s(\lambda, \theta, \phi)$ )可以表示為

$$L_s(\lambda, \theta, \phi) = L_p(\lambda) + \frac{r(\lambda)}{\pi} [K_{TOA}(\lambda) \cos \sigma \tau_1(\lambda) + F E_d(\lambda)] \tau_2(\lambda) \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中

$L_p(\lambda)$  為各波段之路徑輻射量( $W/m^2/\mu m$ )， $r(\lambda)$ 為各波段反射率(無單位)， $E_{TOA}(\lambda)$ 表示進入大氣層頂的太陽入輻射量( $W/m^2/\mu m$ )， $E_d(\lambda)$ 為各波段之下行輻射量，是經由大氣散射後經地表反射而抵達感測器的輻射量( $W/m^2/\mu m$ )， $\sigma$  為太陽入輻射相對於地表之入射角(rad)， $\tau_1(\lambda)$ ， $\tau_2(\lambda)$ 分別表示各波段於太陽-地表與地表-感測器路徑上之大氣穿透率(無單位)， $\theta$ ， $\phi$ 分別為太陽-地表方向的天頂角(rad)與方位角(rad)， $F$  為量化地形或周圍物體所造成的遮蔽因子(無單位)。

在小區域的研究中，假設下行輻射量、路徑

輻射量與大氣穿透率於空間的分布為均勻的(spatially homogeneous)，則(1)式可改寫為

$$L_s(\lambda, \theta, \phi) = K_0(\lambda) + [K_1(\lambda) \cos \sigma + FK_2(\lambda)] r(\lambda) \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中

$$K_0(\lambda) = L_p(\lambda) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$K_1(\lambda) = E_{TOA}(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_2(\tau) / \pi \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$K_2(\lambda) = E_d(\lambda) \tau_2(\tau) / \pi \quad \dots\dots\dots(5)$$

在(2)式中，抵達感測器的輻射量僅與地形條件有關，例如地形坡度、坡向與週遭地形遮蔽等因素，影像中各網格的地形條件變數則由 $\sigma$ 與 $F$ 兩變數描述。

## 三、路徑輻射量推估模式

本文提出基於輻射控制區的大氣校正演算方法(後稱為輻射控制區法或RCA)，並與過去文獻中經常使用的三種大氣校正方法比較，分別是暗體辨識法(Dark-Object Subtraction, DOS)、多波段迴歸法(Multi-band Regression, MBR)與共變矩陣法(Covariance Matrix Method, CMM)，其詳細描述整理如以下各小節。

### 3.1 暗體辨識法(DOS)

DOS的基本概念是在各波段影像中辨識出非常暗(或是反射率接近於零)的地表物體，例如面積大且清澈的水體在近紅外光波段有相當強的吸收能力。若反射率接近於零時，則(2)式中抵達感測器的輻射量僅有路徑輻射量，因此影像中辨識為暗體(dark object)網格中的最小輻射量即代表路徑輻射量，即

$$L_s(\lambda, \theta, \phi) = K_0(\lambda) = L_p(\lambda) \quad \dots\dots\dots(6)$$

當各波段影像中的暗體能被適當地挑選出來時，DOS可得到不錯的成果。然而在可見光波段中，大多數地表物體反射率並不夠接近於零，例如植生於可見光仍有約5至10%的反射率。此外，在山區地形中原本地表土地類別為林地而遭

到地形遮蔽形成陰影區，雖然主要入輻射並未抵達地表，但下行輻射量仍會經地表反射後而被感測器所接收，因此抵達感測器的輻射量包含了路徑輻射量與反射後之下行輻射量，可表示為

$$L_s(\lambda, \theta, \phi) = K_0(\lambda) + [FK_2(\lambda)] r(\lambda) \dots\dots(7)$$

歸納而言，使用 DOS 方法時，若暗體的反射率不夠接近於零與地形陰影遮蔽等兩種情形下，會高估路徑輻射量。

### 3.2 多波段迴歸法(MBR)

為改善 DOS 在可見光波段容易高估路徑輻射量的缺點，Schott (1997)提出多波段迴歸法(MBR)估計可見光波段的路徑輻射量。MBR 首先假設某一波段的路徑輻射量能夠較為準確的推估，例如近紅外光波段的路徑輻射量可由 DOS 法推估而得。進一步假設地表物體的反射率具有無常數項的簡單線性關係

$$r(\lambda_1) = Cr(\lambda_2) + \varepsilon \dots\dots(8)$$

其中  $r(\lambda_1), r(\lambda_2)$  分別為波段 1 與波段 2 反射率， $C$  為迴歸係數， $\varepsilon$  為迴歸誤差。

同樣地假設下行輻射量、路徑輻射量與大氣穿透率於空間上為均勻分布，地表物體為水平且無遮蔽的蘭氏面，則感測器於波段 1 與波段 2 接收的輻射量為可表示為

$$L_s(\lambda_1) = L_p(\lambda_1) + \frac{r(\lambda_1)}{\pi} [E_{TOA}(\lambda_1) \cos \sigma \tau_1(\lambda_1) + F E_d(\lambda_1)] \tau_2(\lambda_1) = L_p(\lambda_1) + m_1 r(\lambda_1) \dots\dots(9)$$

$$L_s(\lambda_2) = L_p(\lambda_2) + \frac{r(\lambda_2)}{\pi} [E_{TOA}(\lambda_2) \cos \sigma \tau_2(\lambda_2) + F E_d(\lambda_2)] \tau_2(\lambda_2) = L_p(\lambda_2) + m_2 r(\lambda_2) \dots\dots(10)$$

其中  $m_1, m_2$  分別為波段 1 與波段 2 的不隨空間改變的常數，此常數包含大氣層頂入輻射量、大氣穿透率與下行輻射量等。忽略第(8)式的迴歸誤差後代入(10)式可得

$$L_s(\lambda_2) = L_p(\lambda_2) + m_2 Cr(\lambda_1) \dots\dots(11)$$

$$L_s(\lambda_2) = L_p(\lambda_2) + \frac{m_2 C}{m_1} (L_s(\lambda_1) - L_p(\lambda_1)) \dots\dots(12)$$

由(12)式，以波段 2 的輻射量與校正後的波段 1 輻射量建立迴歸模式，其截距即為波段 2 之路徑輻射量。

### 3.3 共變矩陣法(CMM)

CMM 方法同時考慮各波段的資料，可視為是 MBR 方法的延伸，其詳細的推導過程介紹如下，假設地表為蘭氏面，忽略下行輻射量( $E_d(\lambda)$ )，衛星感測器接收的輻射量表示為

$$L_{s,i}(\lambda_j) = \cos \sigma_i \frac{r_i(\lambda_j)}{\pi} E_{TOA} \tau_1(\lambda_j) \tau_2(\lambda_j) + L_p(\lambda_j) \dots\dots(13)$$

將(13)式改寫為 Switzer *et al.* (1981)之模式

$$y_{ij} = c_i x_{ij} + L_p(\lambda_j) + e_{ij} \dots\dots(14)$$

$$x_{ij} = \frac{r_i(\lambda_j)}{\pi} E_{TOA} \tau_1(\lambda_j) \tau_2(\lambda_j) \dots\dots(15)$$

其中  $y_{ij}$  為對應於第  $j$  個波段第  $i$  個網格中的感測器接收輻射量。 $c_i$  即為  $\cos \sigma_i$ ， $x_{ij}$  為  $c_i = 1$  時第  $j$  個波段第  $i$  個網格中的太陽主要輻射量， $r_i(\lambda_j)$  為第  $j$  個波段第  $i$  個網格中的反射率， $e_{ij}$  代表(14)式的模式中沒有解釋的部分，例如下行輻射量。同樣地，CMM 亦假設路徑輻射量、大氣穿透率與太陽主要入輻射於研究區域空間中為均勻分布。

假設一測試區域具有相同的地表覆蓋類別，則測試區中的地表反射率( $r_i(\lambda_j)$ )接近於一個常數值，即(15)式中  $r_i(\lambda_j) = r(\lambda_j)$  且  $x_{ij} = x_j$ ，假設測試區中共有  $n$  個像元且具有明顯的地形起伏，故所有像元的  $c_i$  值才不會過於接近，造成迴歸模式不具代表性，基於上述假設(14)式可改寫為

$$y_{ij} = c_i x_j + L_p(\lambda_j) + e_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \dots\dots(16)$$

若影像資料共有  $h$  個波段，則(16)式可改寫為矩陣形式

$$Y = cx' + L_p + E \quad \dots\dots\dots(17)$$

其中  $y_i' = (y_{i1}, \dots, y_{ih})$  ,  $c_i' = (c_{i1}, \dots, c_{ih})$  ,  $L_{pi}' = (L_{pi1}, \dots, L_{pih})$  ,  $e_i' = (e_{i1}, \dots, e_{ih})$  。

欲解出最適當的路徑輻射量，需使得迴歸誤差最小，即採用最小方差法

$$SSE = \sum_i \sum_j (y_{ij} - c_i x_j - L_p(\lambda_j))^2 \quad \dots\dots\dots(18)$$

(18)式對於各未知變數偏微分後整理而得 (Switzer *et al.* 1981)

$$L_p(\lambda_j) = \bar{y}_j - \bar{c}x_j, j=1, \dots, h \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$x = qS_y x \quad \dots\dots\dots(20)$$

其中

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_i y_{ij} \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$\bar{c}_j = \frac{1}{n} \sum_i c_i \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$q = \sum_k x_k^2 / \sum_j \sum_k x_j x_k s_{jk} \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$s_{jk} = \frac{1}{n} \sum_i (y_{ij} - \bar{y}_j)(y_{ik} - \bar{y}_k) \quad \dots\dots\dots(24)$$

$s_{jk}$  為波段  $j$  與波段  $k$  感測輻射量的共變異數， $S_y$  為所有波段感測輻射量的共變異數。第(20)式顯示  $x$  為  $S_y$  矩陣的特徵值，且由物理意義而言應均為正值。

若某一波段的路徑輻射量可被適當推估時，其他波段的路徑輻射量可表示為

$$\bar{c} = \frac{(L_p(\lambda_1) - \bar{y}_1)}{x_1} \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$L_p(\lambda_k) = \bar{y}_k - \bar{c}x_k \\ = \bar{y}_k - (L_p(\lambda_1) - \bar{y}_1) \frac{x_k}{x_1}, \quad k=2, \dots, h \quad \dots\dots(26)$$

雖然 CMM 可以視為 MBR 的延伸方法，但基本假設與適用情形有所差別。MBR 適用於坡度均一的相同地表覆蓋區域，而 CMM 的測試區域則

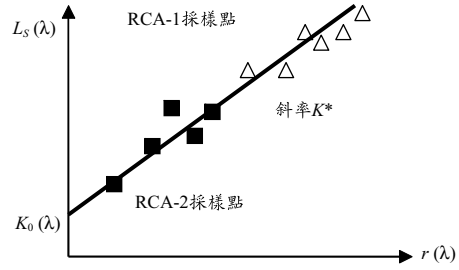


圖 1 輻射控制區法迴歸模式

須具有明顯的地形起伏變動的相同地表覆蓋。

### 3.4 輻射控制區法(RCA)

考慮針對小區域的研究範圍，由(2)式的模式中可發現，除了地表物體反射特性外，地形條件為主要影響抵達感測器輻射量的因素。當輻射控制區位於水平且無週遭地形遮蔽的地區，則  $\cos\sigma$  與  $F$  值可視為常數，故輻射控制區內輻射量與反射率的關係可表示為

$$L_s(\lambda, \theta, \phi) = K_0(\lambda) + r(\lambda)K^*(\lambda) \quad \dots\dots\dots(27)$$

路徑輻射量 ( $K_0(\lambda)$ ) 可透過選取適當的輻射控制區而求得，而輻射控制區須具備均一且穩定的反射特性。輻射控制區內的地表反射率可透過手持式高光譜儀於輻射控制區內採集反射率樣本而得，並配合所使用之衛星影像波段寬度整合為波段反射率。例如選取兩個輻射控制區(RCA-1 與 RCA-2)，令  $r_1(\lambda)$  與  $r_2(\lambda)$  分別表示兩輻射控制區內採樣之地表反射率， $L_{s,1}$  與  $L_{s,2}$  為兩輻射控制區中對應於地面採樣點網格中被衛星所接收輻射量，各波段的路徑輻射量則可透過建立衛星接收輻射量 ( $L_s$ ) 與地面量測反射率 ( $r(\lambda)$ ) 之關係而得，如圖 1 所示。

## 四、研究區域與資料

### 4.1 研究區域

研究區域位於石門水庫庫區周遭，涵蓋面積約 90 平方公里(如圖 2)，高程變動範圍自海拔 100 公尺到 941 公尺，水庫蓄水區位於影像中央。本研究選用福衛二號影像，其拍攝日期為 2008 年 12 月 11 日，福衛二號共有三個可見光波

段，分別為藍光(0.45-0.52  $\mu\text{m}$ )、綠光(0.52-0.60  $\mu\text{m}$ )與紅光(0.63-0.69  $\mu\text{m}$ )以及一個近紅外光波段(0.76-0.90  $\mu\text{m}$ )，空間解析度為 8 公尺。圖 2 中白色虛線方框範圍為 CMM 方法的三個測試區域，其地表覆蓋類別皆為林地。此外，圖 2 中 A-A' 線段所經過的網格則用於計算波段比值，為比較四種路徑輻射量估計方法的指標之一。

研究中選取三個輻射控制區(見圖 3)，RCA-1 為位於石門水庫壩頂旁的空地，RCA-2 位於阿姆坪路旁的空地，RCA-3 為慈湖公園停車場，三個輻射控制區皆為柏油鋪面，挑選柏油鋪面為輻射控制區的理由有三，第一，配合現地定位可清楚於衛星影像中判釋出柏油鋪面，且在台灣地區柏油鋪面為普遍存在的地表覆蓋類別；第二，柏油鋪面相較於草地與水體地表類別而言，其反射特性相對穩定且於空間的分布均勻；最後，柏油鋪面的波段反射率滿足(8)式的條件，可用於 MBR 方法中。除輻射控制區本身的穩定性外，外在環境亦應注意，如避免取得降雨一兩天內衛星影像，另外亦應定期於現地檢視輻射控制區內是否有落葉、樹枝或是其他人為破壞，以確保輻射控

制區之可用性。

#### 4.2 高光譜採樣資料

手持式高光譜儀(GER 1500)用以測量輻射控制區內之地表反射率，以預先經過校正之標準反射板為參考，GER 1500 可間隔 1.5~2 nm 於 350 nm 至 1050 nm 之間記錄反射率。反射率採樣工作於晴朗的天氣下進行，以手持式高光譜儀於每個輻射控制區內均勻的採集地表反射率樣本，輻射控制區內對應於福衛二號影像的網格中，至少有三至四個地面反射率觀測值。各輻射控制區地面採樣的反射率曲線如圖 4 所示，其整體變動趨勢及範圍與文獻中所列資料相近(Adrian and Jobanputra, 2005; Jensen, 2007)，而圖 4(a)中與其它曲線明顯不同的採樣點為新鋪的柏油地表。各個反射率曲線依衛星波段之波長範圍，計算波段平均反射率。依衛星影像網格中對應之採樣點，由各採樣點之波段平均反射率取平均值為對應於影像網格之地面反射率(pixel-reflectance)。

RCA-3 中地表覆蓋包含有白線的油漆(見圖 3)，白線的反射率同樣以 GER 1500 量測，如圖 4(d)所列。福衛影像中於 RCA-3 各網格中包含白線的面積比例約佔 3~8.5%，故依照各網格中白線所佔面積比例與實測反射率，校正衛星網格內之地面反射率。此外，為檢驗植生地表不適用 MBR 方法，研究中挑選一草地，量測其地表反射率，如圖 5 所示，而波段間之關係將於下一章節探討。

#### 4.3 不同波段地表反射率之關係

使用 MBR 方式前，反射率之間的關係必須滿足(8)式，即不同波段的反射率之間必須存在線

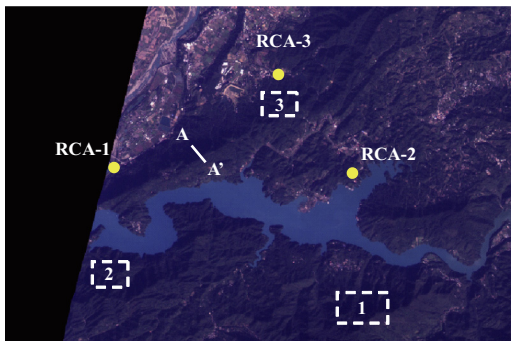


圖 2 研究區域



圖 3 輻射控制區

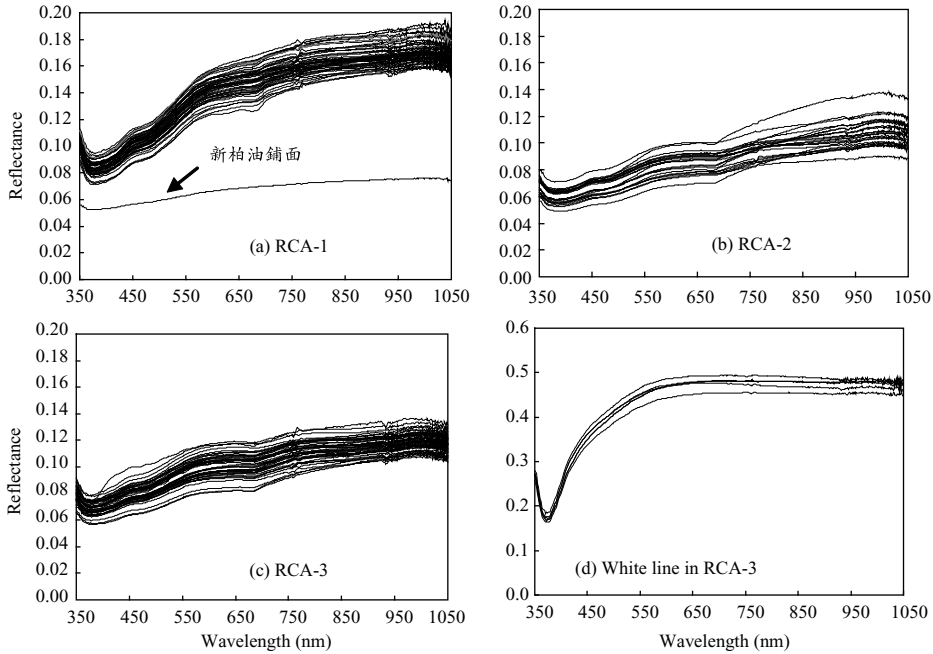


圖 4 各輻射控制區內地面量測之反射率曲線

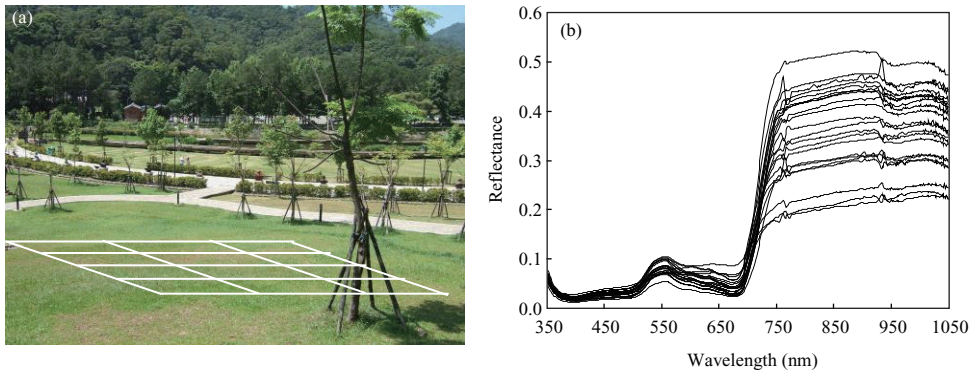


圖 5 (a)量測反射率之草地照片(白線交會點為採樣點示意位置)與(b)反射率曲線

性關係，且截距為零。圖 6 中顯示柏油鋪面與草地兩地表類別不同波段間之線性關係，柏油鋪面於三個可見光波段皆與近紅外光波段有不錯的線性關係，儘管藍光波段與近紅外光波段的線性關係略差一些。相對而言，草地的線性關係則非常差，其原因為植生長狀態並不均勻，加上植生對於近紅外光波段相當敏感，使得近紅外光波段與各個可見光波段間的線性關係不明顯且不穩定。值得一提的是，各輻射控制區中的波段間線性關係也呈現一致的趨勢(圖 6(a))，綜合上

述，足以說明柏油鋪面在反射特性上適合選為輻射控制區。

## 五、結果討論

路徑輻射量由大氣散射現象所產生，大氣散射效應中雷式散射(Rayleigh scattering)與太陽輻射波長的四次方成反比，因此大氣散射效應隨波長增加而快速的降低。當天氣晴朗時，近紅外光波段的路徑輻射量較低，甚至可忽略或假設為零，於 MBR 與 CMM 方法中都基於此假設條件。

表 1 推估路徑輻射量的結果比較

推估方法		路徑輻射量(W/m <sup>2</sup> /sr)		
		藍光波段	綠光波段	紅光波段
DOS		1.662 (69)*	1.026 (36)	0.398 (26)
MBR		1.802 (75)	0.761 (27)	0.246 (16)
CMM	測試區域 1 (128 × 70 pixels)	1.697 (70)	0.995 (35)	0.362 (24)
	測試區域 2 (100 × 76 pixels)	1.787 (74)	1.067 (37)	0.405 (27)
	測試區域 3 (79 × 44 pixels)	1.859 (77)	1.126 (40)	0.437 (29)
平均		1.781 (74)	1.063 (36)	0.401 (26)
RCA		0.943 (39)	0.810 (28)	0.246 (16)

\*：括號中的數字為對應之灰階值

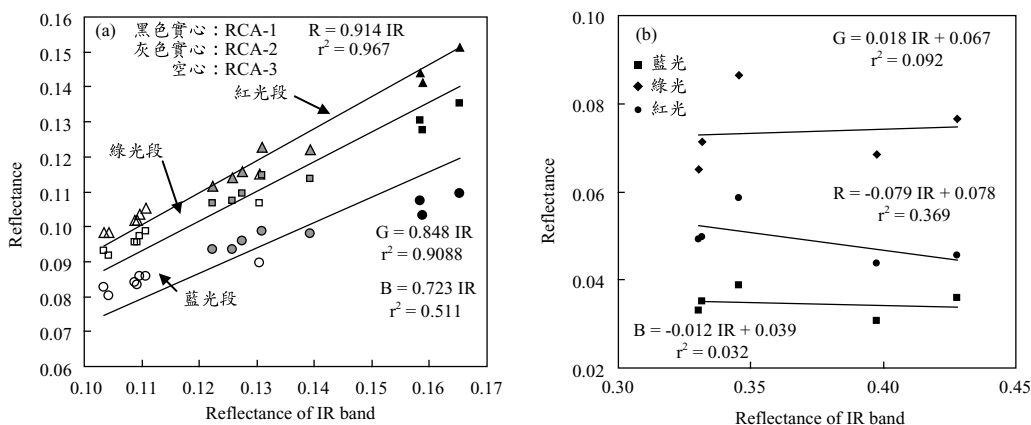


圖 6 柏油鋪面(a)與草地(b)可見光波段與近紅外光波段反射率之關係



圖 7 各波段影像之最小灰階位於影像右下方山區陰影(標示為白色的像元)

本研究亦採用此假設，並以不同方法推估可見光各波段的路徑輻射量，推估結果如表 1 所示。

DOS 方法直接以各波段之最小灰階值乘上轉換係數(Gain)後得到路徑輻射量，圖 7 為各波段影像所挑選出最小灰階的所在地，均位於受到地形陰影遮蔽的林地覆蓋，如同前述，此情形下採用 DOS 方法容易高估路徑輻射量。

MBR 方法須假設近紅外光波段之路徑輻射量為零，並選取符合(8)式的地表覆蓋作為輻射控

制區，最後以輻射控制區內的像元，建立三個可見光波段與近紅外光波段衛星接收輻射量的線性關係，各迴歸關係式之截距即為各可見光波段之路徑輻射量。圖 8 為各波段 MBR 迴歸模式的圖，而推估的路徑輻射量則列於表 1。然而本研究建立之 MBR 迴歸模式並不穩定，其判定係數均偏低。

CMM 方法使用上則須挑選具有均勻地表覆蓋與地形起伏大的測試區域，本研究選用的三個



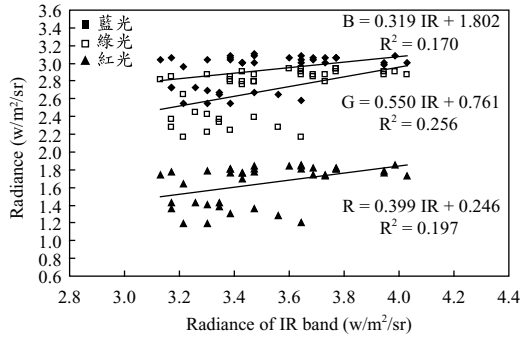


圖 8 多波段迴歸模式(各迴歸模式之截距即為路徑輻射量)

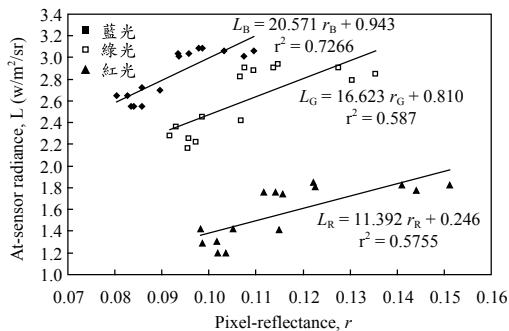


圖 9 各可見光波段之 RCA 模式

測試區域皆為林地覆蓋，且地形起伏大、坡向不同的區域。假設近紅外光波段之路徑輻射量為零，以(26)式計算三個可見光波段之路徑輻射量(如表 1)，可發現三個測試區中各波段的路徑輻射量皆差不多，除顯示挑選的測試區域符合此方法要求外，也證明影像範圍內的路徑輻射量在空間上的變異不大，即路徑輻射量於小區域的研究中是可假設在空間上為均勻分布的。

RCA 法的優點在於不需要假設近紅外光波段之路徑輻射量為零，而配合輻射控制區內實際量測之反射率資料，建立地表反射率與衛星接收輻射量之迴歸模式，而各迴歸模式的截距即為路徑輻射量，如圖 9。

由於並沒有實際觀測路徑輻射量，本文以幾個間接指標來評估不同方法推估的路徑輻射量。第一個指標是依據大氣散射效應(尤其是雷式散射)隨波長遞減的現象，因此隨著波長越長，路徑輻射量應該越低，表 1 中各方法均呈現此一現

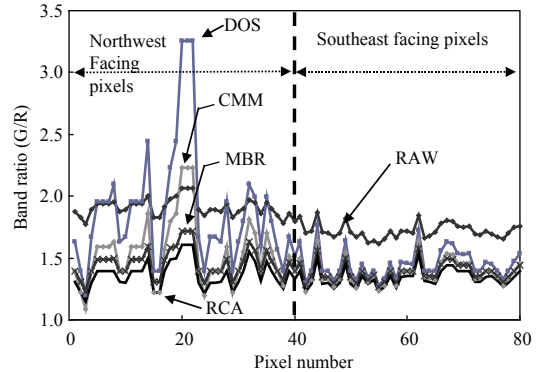


圖 10 以 A-A'線段下之像元計算波段比值

象。第二個指標則基於比較四種方法推估之路徑輻射量的大小，由於 DOS 法高估路徑輻射量，因此其他三種方法如果是恰當的推估方式，則推估的路徑輻射量應小於 DOS 方法的結果。CMM 模式中並未考慮反射的下行輻射量，因此下行輻射量被歸納於殘差項中，為使得殘差最小，因此趨於高估路徑輻射量，而此高估的量則隨著波長增加而下降。CMM 方法的優點在於可了解影像中各測試區域的路徑輻射量分布，而其他三種方法於小區域中僅能計算一個路徑輻射量值。

另外一評估指標採用波段比值法，由於波段比值可去除大部分的地形效應，假如路徑輻射量已適當去除，則對於同一地表類別而言，波段比值的標準偏差應降低，且與地形起伏無關。研究中選用圖 2 中 A-A'線段所經過的 80 個像元，其通過的地表類別為非常均勻的林地，然而約一半的像元面向西北方(背陽面)，另一半則面向東南方(向陽面)。綠光與紅光波段經扣除各方法推估的路徑輻射量後，計算波段比值(G/R)後繪製如圖 10，其中原始波段比值(RAW)為不移除路徑輻射量而直接以衛星接收輻射量計算波段比值。由原始波段比值曲線可發現面向西北方與東南方的像元，有明顯的不同，若仔細觀察東南方的像元，原始波段比值均高於其他去除路徑輻射量的比值。背陽(面向西北方)的像元更能顯示出四個方法的優劣，背陽區域的像元由於太陽入輻射被地形遮蔽，因此相同地表覆蓋於背陽面所呈現的灰階值較低，則扣除路徑輻射量時，對於高估路

表 2 線段 A-A'線段下波段比值之平均值與標準偏差

	RAW		DOS		CMM		MBR		RCA	
平均值	1.81		1.66		1.46		1.42		1.35	
	NW*	SE	NW	SE	NW	SE	NW	SE	NW	SE
	1.908	1.719	1.874	1.452	1.540	1.383	1.458	1.385	1.369	1.339
標準偏差	0.116		0.412		0.219		0.104		0.095	
	NW	SE	NW	SE	NW	SE	NW	SE	NW	SE
	0.072	0.060	0.488	0.116	0.274	0.100	0.118	0.072	0.114	0.070

\*：NW 代表面向西北方(背陽面)的像元所計算之波段比值平均值與標準偏差，SE 代表東南方(向陽面)

徑輻射量較為敏感，如 DOS 與 CMM 的波段比值出現不正常的波段比值，即為高估路徑輻射量所致，此現象與 Switzer *et al.* (1981)的發現相同。而 RCA 法其背陽的波段比值與面陽的像元位於相同的水平上，為四種方法中表現最佳的。四種波段比值的平均值與標準偏差列於表 2，背陽與向陽的像元一起計算標準偏差時，可發現 RCA 法具有最小的標準偏差。若分別探討背陽(NW)與向陽(SE)的像元，只以標準偏差來判斷時，雖然 RCA 法為四種方法中標準偏差最小，但均高於不移除路徑輻射量(RAW)的波段比值，然而由背陽與向陽像元計算的平均值來看，RCA 法之波段比值其背陽與向陽面的平均值差異最小，因此由波段比值的平均值與標準偏差兩指標可看出，整體而言 RCA 法於推估路徑輻射量的表現最佳，DOS 為最差。

## 六、結 論

本研究提出基於輻射控制區的路徑輻射推估流程，並與其他常用的大氣校正方法(DOS, MBR, CMM)比較後，本文所提之方法具有最佳的推估結果，以下為幾點重要結論：

- (1) 輻射控制區的挑選，必須是均勻的地表覆蓋與穩定的反射特性，地形條件應類似，例如皆為水平且無遮蔽的地形，雖然柏油鋪面的反射率相對於草地穩定，建議於每幅影像取得日前後於輻射控制區現地量測反射率，針對長期的研究應定期前往現地量測反射率，並檢視輻射控制區是否受外在環境影響。
- (2) 應用 MBR 方法時，只有某些地表類別滿足波段間線性關係的條件，如柏油鋪面於研究中

發現為適當 MBR 方法的地表類別，而草地則不建議採用，因草地生長狀態不均勻且於近紅外光波段非常敏感，並不滿足波段間線性關係的條件。

- (3) CMM 方法趨於高估路徑輻射量，且高估的程度隨波長增加而遞減。
- (4) 由三個間接指標發現 RCA 法為最佳的方法，採用波段比值評估時，應同時考慮平均值與標準偏差，而 RCA 法於背陽與向陽面的平均值差異最小，且整體標準偏差最低。反之，DOS 法表現為最差。
- (5) 雖然 MBR 方法的推估結果與 RCA 法相近，然而本研究所建立的 MBR 模式判定係數偏低，且在藍光段出現過於高估路徑輻射量的情形。

## 參考文獻

1. 張世駿、江介倫、吳進龍、鄭克聲、陳增壽，2006，衛星遙測影像應用於地表變遷偵測之研究，農業工程學報，第 52 卷，第 3 期，第 21-31 頁。
2. 蘇元風、吳宜珍、蘇明道、鄭克聲，2009，SPOT 衛星影像應用於近岸水質推估模式建立與評估，農業工程學報，第 55 卷，第 2 期，第 28-41 頁。
3. Adrian, W. Jobanputra, R., 2005, Influence of Pavement Reflectance on Lighting for Parking Lots. Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2458.
4. Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007, Satellite-based energy balance for mapping

- evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **133(4)**: 380-394.
5. Bastiaanssen W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998, A remote sensing surface balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, **212**: 198-212.
  6. Chavez, P.S., 1975, Atmospheric, solar, and M.T.F. corrections for ERTS digital imagery. *Proceedings, American Society of Photogrammetry*, 69-69a.
  7. Cheng, K.S., Lei, T.C., 2001, Reservoir trophic state evaluation using Landsat TM images. *Journal of American Water Resources* **37(5)**: 1321-1334.
  8. Cheng, K.S., Wei, C., Chang, S.C., 2004, Locating landslides using multi-temporal satellite images. *Advances in Space Research* **33**: 296-301.
  9. Hadjimitsis, D.G., Clayton, C.R.I., Retalis, A., 2009, The use of selected pseudo-invariant targets for the application of atmospheric correction in multi-temporal studies using satellite remotely sensed imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **11**: 192-200.
  10. Jensen, J.R., 2007, *Remote Sensing of the Environment*. Pearson Prentice Hall.
  11. Kaufman, Y.J. Sendra, C., 1988, Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing* **9(8)**: 1357-1381
  12. Kaufman, Y.J., Wald, A.E., Remer, L.A., Gao, B.C., Li, R.R., Flynn, L., 1997, The MODIS 2.1- $\mu\text{m}$  Channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **35(5)**: 1286-1298.
  13. Moran M.S., Inoue, Y., Barnes, E.M., 1997, Opportunities and limitations for image-based remote sensing precision crop management, *Remote sensing of Environment*, **61**: 319-346.
  14. Porter, J.F., 1984, The channel correlation method for estimating aerosol levels from multispectral scanner data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **50**: 43-52.
  15. Quarmby, N.A., Milnes, M., Hindlet, L., Silleos, N., 1993, The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction, *International Journal of Remote Sensing*, **14(2)**: 199-210.
  16. Rees, W.G., 2005, *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press.
  17. Richter, R., 1996, A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *International Journal of Remote Sensing* **17**: 1201-1214.
  18. Ridd, M.K., Liu, J., 1998, A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote Sensing of Environment* **63**: 95-100.
  19. Slater, P.N., 1980, *Remote Sensing – Optics and Optical Systems*. Addison-Wesley Publishing Co.
  20. Schott, J.R., 1997, *Remote Sensing – The Image Chain Approach*. Oxford University Press.
  21. Switzer, P., Kowalik, W., Lyon, R.J.P., 1981, Estimation of atmospheric path-radiance by the covariance matrix method. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **47**: 1469-1476.
  22. Su, Y.F., Liou, J.J., Hou, J.C., Hung, W.C., Hsu, S.M., Lien, Y.T., Su, M.D., Cheng, K.S., Wang, Y.F., 2008, A multivariate model for coastal water quality mapping using satellite remote sensing images. *Sensors* **8**: 6321-6339.
  23. Teng, S.P., Chen, Y.K., Cheng, K.S., & Lo, H.C., 2008, Hypothesis-test-based landcover change detection using multi-temporal satellite images—A comparative study. *Advances in Space Research* **41**: 1744-1754.

收稿日期：民國 99 年 3 月 10 日  
 修正日期：民國 99 年 3 月 26 日  
 接受日期：民國 99 年 4 月 1 日