

空載多波段資料推估地表蒸發散量之研究

劉說安¹ 陳奕穎² 張子瑩³

1. 國立中央大學 太空及遙測研究中心 暨 水文/太空科學研究所 教授

Email: yueian@csrsr.ncu.edu.tw

2. 國立中央大學 水文科學研究所 研究生

3. 國立中央大學 太空科學研究所 研究生

一、摘要

本文利用空載遙測資料、可見光與熱紅外光多波段資料，配合地面氣象站所量測得的觀測資料，進行地表通量的估計，地表通量包括蒸發散量及可感熱通量。推估方法基於地表能量平衡方程式，反演的地表參數包含反照率 (albedo)、地表溫度及標準差植被指數 (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)。其中，對於地表溫度的部分，係利用 NDVI 推求熱紅外光波段的放射率，再透過 Lowtran7 程式校正大氣所造成的微小誤差；最終，將校正的輻射量轉換為地表溫度。至於潛熱通量與可感熱的分配，則以乾、濕控制條件配合推求。最後與現場量測值做比對，說明透過多波段遙測資料推估潛熱通量與可感熱通量的合理性。

關鍵字：蒸發散、遙測、潛熱。

Abstract

This paper investigates the remote sensing of evapotranspiration (ET) of the rice paddy in Wufeng, Taichung, Taiwan by applying airborne visible and thermal infrared multi-spectral data and ground-based meteorological

measurements. The estimate of latent heat and sensible heat transfer is compared with those computed by the S-SEBI model. To derive the surface emissivity, we implement the relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and the emissivity in thermal channel. Subsequently, the Stefan Boltzmann Law is applied to derive the surface temperature. From acquired on April 28, 2003, the airborne images included excellent dry and wet control pixels which identified and permitted us to determine the evaporative fraction for further partitioning of ET and sensible heat transfer. The derived energy transfer components are validated by the corresponding *in situ* measurements.

二、概論

近十幾年來有許多學者應用各種衛星 (METEOSAT、AVHRR、LandSat、SPOT) 資料遙測地表之蒸發散量 (Price, 1990; Choudhury, 1997; Kustas et al., 1994; Bastiaanssen et al., 1998; Roerink et al., 2000; Boegh et al., 2002)。在國內方面，我們曾利用 Landsat 與 SPOT 衛星資

料，遙測水稻田的蒸發散量(鍾等人，2002)；由於台灣農業田區範圍一般較畸零，因此空間解析度成為使用衛星資料遙測農田蒸發散量的重要考量因素，當衛星解析度不足時則空載取而代之。

本研究利用直昇機酬載 DUNCAN MS3100-CIR 多光譜數位成像儀及熱紅外光濾鏡高光譜影像儀；獲得紅光、綠光及近紅外光三個波段的資訊與熱紅外波段的資訊。以獲得四個波段的影像，配合新發展出來的推演法來估計水稻田區的蒸發散量。

先前鍾等人(2002)的研究引進 Roerink et al. (2000)所提出的 S-SEBI 模式推估水稻蒸發散量時，缺乏現場採樣資料做驗證，因此推估量的準確性仍有待證實。本研究中利用試區內架設通量儀(eddy correlation)實測潛熱通量。將實測成果驗證新推估的蒸發散量，並評估 Roerink 等人(2000)的 S-SEBI 模式。發表潛勢蒸發散演算法所推算的結果。

三、研究方法

壹、能量平衡及輻射量平衡原理

在能量平衡原理中，忽略植物光合作用所需的能量及熱容量，所以淨輻射量扣除土壤熱通量後的輻射量會被用來加熱地表(可感熱)及蒸發散地表的水分(潛熱)。可感熱為地面和大氣間的傳導，潛熱則包含土壤蒸發及植物蒸散過程。而地表能量平衡的概念如(1)式：

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \quad (1)$$

其中， R_n 為淨輻射[W/m²]， G_0 為土壤熱通量[W/m²]， H 為可感熱通量(sensible heat flux)[W/m²]， λE 為潛熱通量(latent heat flux)[W/m²]。

在輻射量平衡原理中，淨輻射是總

和所有長短波長入射、出射能量作用的結果。當入射長、短波輻射扣除地表放射長波輻射及反射短波輻射後，所得輻射量即為淨輻射量，如(2)式：

$$R_n = K^\downarrow - K^\uparrow + L^\downarrow - L^\uparrow \quad (2)$$

其中， K^\downarrow 為入射短波輻射量[W/m²]， K^\uparrow 為地表反射的短波輻射量[W/m²]， L^\downarrow 為入射長波輻射量，來自雲層及大氣的貢獻[W/m²]， L^\uparrow 為地表的放射長波輻射量[W/m²]。

貳、能量平衡項的求法

1. 地表淨輻射量

主要是利用上述的輻射量平衡原理 $R_n = (1 - r_0)K^\downarrow + L^\downarrow - L^\uparrow$ 推求淨輻射量 R_n ，其中 K^\downarrow 與季節、所在緯度及時間有關，一般可由此三項參數算出，本研究以測值代入。 K^\uparrow 為 $K^\downarrow \times r_0$ 。 $L^\uparrow = \sigma T_0^4$ ，但要有地表溫度的配合。 r_0 為地表反射率。 L^\downarrow 來自雲層及大氣的貢獻，可利用空氣溫度、蒸氣壓估計入射長波輻射量(Prata, 1996)：

$$\begin{aligned} L^\downarrow &= e_{sky} \sigma T_a^4 \\ e_{sky} &= \left\{ 1 - (1 + xi) \exp \left[-(1.2 + 3xi)^{0.5} \right] \right\} \quad (3) \\ xi &= C_0 (vap / T_a) \end{aligned}$$

式中 e_{sky} 為大氣放射率[-]。 vap 為水汽壓[kpa]。 T_a 為氣溫[K]。其中 C_0 隨著區域性的氣候條件、氣溫遞減率、水氣含量的尺度高度而改變，以台北淡水站之探空氣球 2000 年的資料做分析，在無降雨的條件下 C_0 為 52.6。

2. 土壤熱通量

因為試驗區域位於台中縣霧峰鄉，屬於植被密度大的區域，可根據 Bastiaanssen 等人(1998)提出以遙測地表

溫度估計 G_0 。此經驗式為地表反照率、地表溫度和 NDVI 的函數，可表示為：

$$\Gamma = T_0(0.0032 + 0.0062r_0)(1 - 0.978NDVI^4) \quad (4)$$

3. 潛熱與可感熱通量

本研究應用 (Monion and Obukhov, 1954) 所提出推估熱通量傳輸的方法做計算。以往曾有 Stricker 與 Brutsaert 於 1978 年利用此類的容積方程式 (bulk formula) 估算地表熱通量。該研究指出近地表熱通量傳出至大氣層時，會受到大氣穩定度的影響而改變。可感熱可以表為下式：

$$H = \frac{u_* \cdot \kappa \cdot \alpha_h \cdot c_p (T_s - T_a)}{\left\{ \ln\left(\frac{z_2-d}{z_1-d}\right) - \left[(\Psi_h \frac{z_2-d}{L}) \right] + \left[(\Psi_h \frac{z_1-d}{L}) \right] \right\}} \quad (5)$$

其中

$$u_* = \frac{u_r \cdot \kappa}{\left\{ \ln\left(\frac{z_r-d}{z_0}\right) - \left[\Psi_m \cdot \left(\frac{z_r-d}{L}\right) \right] \right\}} \quad (6)$$

$$L = \frac{-u_*^3 \cdot \rho}{\kappa \cdot g \left[\left(\frac{H}{T_a c_p}\right) + 0.61E \right]} \quad (7)$$

κ 為 von Karman's 常數 ($\kappa=0.4$) [-]， u_* 為摩擦速度 ($u_*=(\tau/\rho)^{1/2}$)， ρ 為空氣的密度 [kg/m^3]， α_h 為熱傳渦度擴散係數與穩定大氣條件下渦度黏滯係數的比值 [-]， c_p 為空氣的比熱 [$\text{J}/\text{Kg} \cdot \text{K}$]， T 為溫度 [K]，下標 s 、 a 分別地表層溫度與氣溫， z 為參考高度 [m]，下標 r 、 1 、 2 分別於三個不同高度下所量測， d 為零風速面的位移高度 [m]； u_r 於某參考高度所量測得的風速 [m/s]； L 為 Monion and Obukhov (1954) 大氣穩定度尺度長度 [-]， g 為重力加速度值 [m/s^2]。

再來引入 Dyer (1974) 對於 Ψ_m 與 Ψ_h

兩個修正函數所做的歸納，假設 $\alpha_h=1.0$ 、 $\kappa=0.4$ ，於大氣條件為穩定與非穩定的條件下即 $L>0$ 時：

$$\Psi_h = \Psi_m = \frac{-5(z_r - d)}{L} \quad (8)$$

與 $L<0$ 時：

$$\Psi_h = 2 \ln \left[\frac{(1+x_h^2)}{2} \right] \quad (9)$$

$$\Psi_m = 2 \ln \left[\frac{(1+x_m)}{2} \right] + \ln \left[\frac{(1+x_m^2)}{2} \right] + 2 \arctan(x_m) + \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

$$x_h = x_m = \left[1 - \frac{16(z_r - d)}{L} \right]^{1/4} \quad (11)$$

計算參數的假設：於計算水稻田區的潛熱與可感熱通量，依水稻的生長特性給定 d 值與 z_{om} ，其值分別為 $0.7h$ 與 $0.018 \cdot LAI$ ，分別為水稻的生長高度 h 與水稻葉面積指數 (Leaf Area Index)。

迭帶計算的步驟：首先假設 L 值為一個極大值 ($L=1000\text{m}$) 也就是假設大氣為近中性 (Neutral) 的狀態，因此 Ψ_h 與 Ψ_m 兩個修正函數值非常低並可以視為零。在經由先前的假設以第 (5) 式估算可感熱通量。在 G_0 與 R_n 已知的條件下，故可由能量平衡的概念推求最後的潛熱通量。此時可以進行第一次迭帶程序，即將先前所推估的潛熱通量結果帶入第 (7) 式再次估算 L 值。此時可獲得一個新的 L 值，重複上述的步驟直至 L 值達到收斂 (將收斂的條件設定為迭代的 L 值差距小於 1%)，即停止迭帶程序的計算。

乾、濕的控制概念：由於遙測影像

可以取得大範圍的影像，有時包含許多較為乾燥或較為潮濕的區域。因此上述的計算在某些區域會產生高或低估的現象。要克服此困難可以利用遙測資料的多光譜特性，可以繪製地表溫度與地表反照率的散佈圖來決定其分配的比值？(Roerink, 2000；鍾等人, 2002；劉等人, 2003)。因此水稻田區實際的蒸發散量，即可表示為下式：

$$ET_f = \Lambda \times ET \quad (11)$$

$$H_f = R_n - G_0 - ET_f \quad (12)$$

其中 ET_f 為水稻田區實際的蒸發散量 [W/m^2]， H_f 為水稻田區的可感熱通量 [W/m^2]。

四、結果與討論

壹、遙測試驗田區

以 2003 年 04 月 28 日當天中午以直昇機搭載多波段的高解析度載具進行觀測，其氣象資料由農試所的氣象站所提供，由於空拍的時段約於當天中午到下午一點，故取氣象站下午一點所記錄的資料做為大氣的背景條件。平均氣溫為 $31.8^\circ C$ ，相對溼度為 62.7%，淨短波輻射強度為 $2.24 [MJ/m^2/hr]$ ，10 公尺之風速 $5.6 [m/s]$ 。

依照上述的大氣條件進行計算水稻田區的潛式蒸發散量，其結果如圖 1 所示。再將地表反照率與地表溫度繪製成空間散佈圖，成果如圖 2。由此空間散佈圖中得知水稻田區像元值，落在影像中地表反射率較低的部分約在 0.2 至 0.5 之間；其他像元之反射率相較之下高出許多，這些像元為反應於試驗當天放置於田埂上之輻射校正白板所致。使用此種同時具有乾、濕控制像元的影

像，即可提供決定乾、濕控制包絡線的參考。依照此種特性所求出的包絡線如圖 3 所示，其迴歸包絡線定義為下(13)、(14)兩式：

$$T_H = -4.980r_0 + 50.710 \quad (13)$$

$$T_{\lambda E} = 4.002r_0 + 41.574 \quad (14)$$

其中 T_H 為乾控制包絡線， $T_{\lambda E}$ 為濕控制包絡線。經由乾、濕控制包絡線即可定義影像中各像元潛熱與可感熱的分配比例，結果如圖 4 所示。比較 S-SEBI 模(圖 5)與潛勢蒸發散法(圖四)所計算出的結果。兩者的趨勢是相同的，但是要注意的為兩者所估計的量值上的差異。

貳、實測試驗田區

為了獲取水稻田區地表熱通量資料，乃採用通量計於第 77 號水稻田區架設渦度通量儀實測水稻田區的各個熱通量值。其結果如圖 6 所示。結果顯示，以 S-SEBI 模式推求水稻田蒸發散量，其值與渦度通量儀實測值差距較大(約一百瓦特每小時)；但是若能取得遙測當時的微氣象資料配合潛勢蒸發散與乾、濕控制的能量分配法則，即可以獲得較精確的估計量值、如圖 4 所示。因此，認定新的推演法較適用於水稻田區蒸發散量估算。

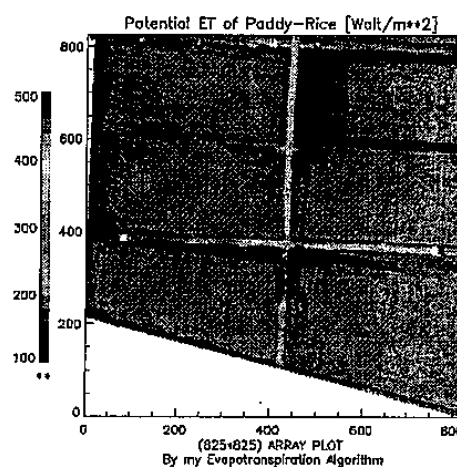


圖 1. 遙測水稻田區的潛勢蒸發散量

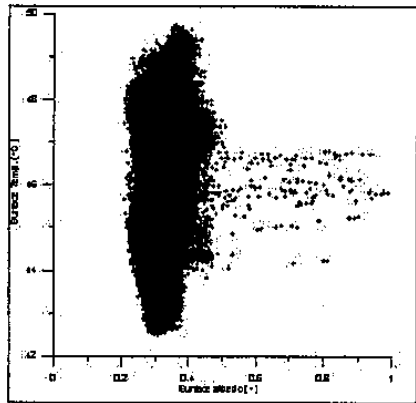


圖 2. 地表溫度與反照率的空間散佈圖

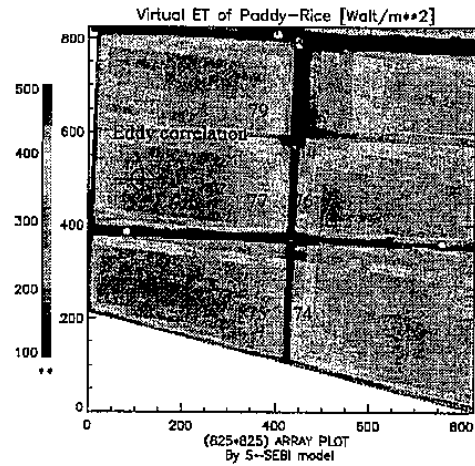


圖 5. S-SEBI 法推求水稻田區蒸發量

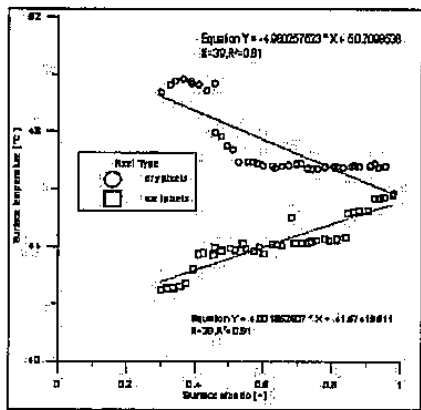


圖 3. 乾、濕的曲線控制回歸圖：方、圓形分別為程式選取的乾勢控制像元

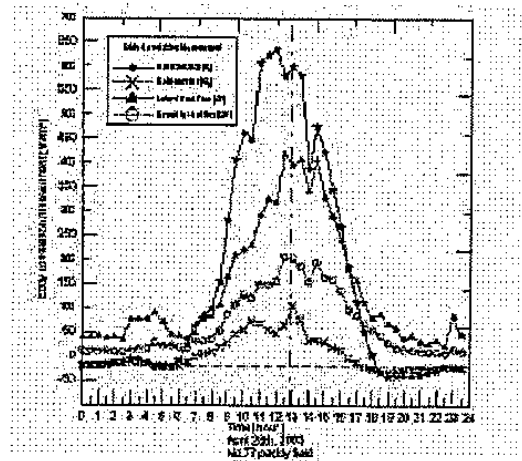


圖 6. 於 77 號田區渦度通量儀的實測值

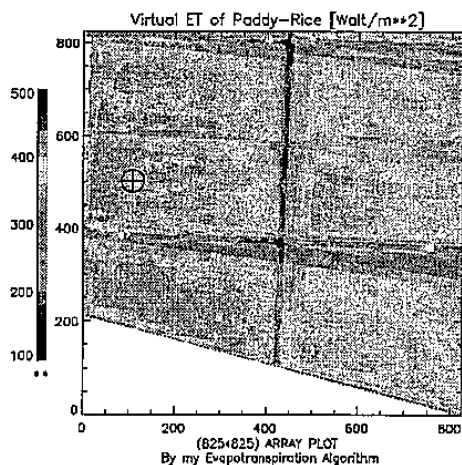


圖 4. 遙測水稻田區可能的蒸發散量

五、結論

綜合上述所有的研究內容，並探討所得的實測結果。我們可以獲得下列兩點結論：

1. 以地表能量平衡的觀念，配合多波段遙測資料求取地表蒸發散量具可行性。但欲利用 S-SEBI 模式求取水稻田的蒸發量時，必須注意乾、濕的選取。一般而言，水稻田田區水分較充足，可挑選成為濕控制像元；而田埂區域的像元較缺乏水分，可挑選成為乾控制像元。
2. 加入氣象站的微氣象資料後，修正了大氣不穩定所造成的影響，因此可精確計算出試區內蒸發散量與可感熱通量，解決了於不穩定的大氣條件下所造成的影響。

六、致謝

承蒙行政院農委會於「水稻田精準農業(耕)體系」研究計劃中供經費的支持，並感謝工研院的廖子毅先生在DUNCAN空載機具資料的處理。更感謝中興大學申雍教授與農試所楊純明教授、李小姐於實驗期間鼎力相助。

六、參考文獻

- 鍾譯靚、劉說安、李天浩、梁隆鑫、申庸、楊純明、吳啟南，「利用遙測推估農作物蒸發散量之研究」，應用於水稻精準農業體系之知識與技術，65-78 頁，2002。
- 劉說安、陳奕穎、張子瑩、徐誌豪、申庸、楊純明、吳啟南，「利用空載多波段資料推求水稻田蒸發散量之研究」，水稻精準農業體系，61-72 頁，2003。
- Boegha, E., H. Soegaard, A. Thomsen, "Valuating evapotranspiration rate and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance" *Remote Sensing of Environment*, Vol.79 pp.329-343, 2002.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., and Holtslag, A.A.M., "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation." *Journal of Hydrology*, Vol.212, pp.198-212, 1998.
- Choudhury, B.J., "Estimating evaporation and carbon assimilation using infrared temperature data." In: Asrar, G. (Eds.), *Vistas in modeling, in Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. Wiley, New York, pp.628-690, 1989.
- Choudhury, B.J., "Synergism of Multispectral Satellite Observations for Estimating Regional Land Surface Evaporation" *Remote Sensing of Environment*, Vol.49 pp.264-274, 1994.
- Dyer, A.J., "A review of flux-profile relationships," *Boundary-Layer Meteorol.*, vol.7 pp.363-372, 1974.
- Kustas, W.P., E.M. Perry, P.C. Doraiswamy, M.S. Moran, "Using Satellite Remote Sensing to Extrapolate ET Estimates in Time and Space over a Semiarid Rangeland Basin" *Remote Sensing of Environment*, Vol.49 pp.275-286, 1994.
- Monin, A. S., and A. M. Obukhov, "Dimensionless characteristics of turbulence in the surface layer." *Akad. Nauk SSSR, Geofiz. Inst., Tr.*, 24, 1954, pp.163-187.
- Prata, A.J. "A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface." *In the Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 122, pp.1127-1151, 1996.
- Price, John C. "Using Spatial Context in Satellite Data to Infer Regional Scale Evapotranspiration" *Adv. Space Res.* vol. 28 no.5, 1990, pp940-948
- Roerink, Su, Menenti, "SEBI: A simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance" *Phys. Chem. Earth (B)*, Vol.25 pp.147-157, 2000.
- Stricker, H., and Brutsaert, W., "Actual evapotranspiration over a summer period in the HUPSEL catchment," *Journal of Hydrology*, vol.39, pp.139-157, 1978