

# 13 農作物水分狀態及光譜遙測技術之利用

陳榮坤、楊純明

行政院農委會農業試驗所農藝組

E-mail:cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要	158
壹、前言	158
貳、水分在農作物體內的生理功能	159
參、植體水分狀態的估測方法及指標	160
肆、作物植株葉片反射光譜	161
伍、田間農作物植被反射光譜	162
陸、植被光譜特徵與植體水分狀態的關係及其利用	164
柒、結語	166
捌、參考文獻	167
英文摘要	170

# 13 農作物水分狀態及光譜遙測技術之利用

陳榮坤、楊純明

行政院農委會農業試驗所農藝組

E-mail:cmyang@wufeng.tari.gov.tw

## 摘要

田間水分管理與利用是農作物栽培生產過程中相當重要的一環，如何適時適法的供給田間作物適量的水分，兼顧作物生產需求及水資源有效利用，是世界各先進國家積極探討的課題。本文回顧部分文獻，於文中陳述一些可以作為應用的研究結果，特別提到近年來光譜遙測技術在作物水分狀態估測上的研究進展。本文並建議農業部門的最佳因應對策，就是加強農作物生產的水分管理與利用相關研究，找出各方均能接受的策略以求充分而有效的運用寶貴水源。

關鍵詞：光譜遙測技術、水資源、水分管理與利用、水分狀態、反射光譜。

## 壹、前言

大自然是由有機物和無機物所構成，生生不息循環不已，水正巧是連接的媒介，扮演溝通和啟動的橋樑。在有機物的植物界，水是植物體內一項非常重要的組成分，佔植體鮮重的70~90%不等，具有支持、運輸、代謝、生長等多種生理生化功能。農作物植株體內水分的可利用性，是植株生存的限制因子，也是農作物生產過程中普遍遭逢的限制因素。農作物種子發芽及植株的生長、發育、代謝活性乃至於最終產量的高低與品質的優劣，均明顯受到體內水分狀態的影響。水分供應不足時植株便進入凋萎狀態，若情況長期持

續，農作物即可能生育停頓、老化、甚至於死亡。相反的，當水分供應過量，植株也無法正常生長。在長期間土壤積水或淹水狀態下，可能造成植株根部無法呼吸或植體萎凋、脫水、潰爛，嚴重時亦造成死亡。因此，農作物的一生，受到水的影響極大。

不同作物種類所需要的水量有所差別，同一作物在生育期間也依生育階段的不同而異，其需水量(water requirement)因時因地變化不一。例如穀類作物生育初期需水量多，隨生育期的推展而逐漸降低，大多在抽穗或開花期達到最低，再隨著成熟而增加。而抽穗開花期的需水量低下，一方面顯示作物在此時期能夠最有效的利用水分，另一方面也反應作物在此時期最

容易受到缺水或乾旱的影響，進而降低穀實產量及品質。

臺灣地區雖屬海島型氣候，但特殊的地理與地型條件以及降雨量分佈的不均，使得水資源相當有限，水資源的有效管理與利用一直是潛在問題。長期以來地球生態環境遭受嚴重破壞，全球氣候變化異常，氣候變遷快速，降水頻率及分佈更顯混亂而極端，水資源日益缺乏而乾旱的發生卻與日俱增。此外，全球各地工商業的急速發展，加上民生用水的大量需求，已使能分配於農業利用的水資源日趨減少，更加突顯水資源管理與利用的重要性。總此情境，生活在臺灣地區的國人更應當重視水資源有關議題，就農業部門而言，則在於如何能夠在水資源不足狀況下開拓及涵養水源，同時謀求用水效率的提升以發揮作物生產最大潛能。

依據行政院經濟部之統計，臺灣地區水資源總量中農業灌溉用水約佔60-65%。然而，經過詳細追究分析，其實農業灌溉用水中的約64%水量屬於可直接回收的『活水』，一部分(約42%)補注地下水源，另一部分(約22%)回歸入地面水源(如溝渠、河川、湖泊、大海等)。後者流經地面時，可以多功性的淨化水質、改善農村與都市景觀、維護親水生態環境等，具有生活與生態上的意義。在所謂“不可回收”消耗於農業生產的約36%水量中，有一部分(通常小於5%)結合成作物體質之成分而貢獻於作物生產，另一部分(約95%)蒸發散進入大氣，投入於調節天氣與氣候及增加降水機率。因此，從水循環的觀點，農業灌溉用水最終回歸於地球水資源庫，絕對沒有無理消耗或多餘浪費情事，其在農村之生產、生活及生態上的“三生功能”更是無

以取代。居此在臺灣邁入工商業導向的現階段，「農業水資源合理化利用」確實是一項國家經濟發展的重要議題，但是重點並不是在於農業灌溉用水占用比例的高低，而是如何提高水分在農業生產利用上的效率與效能，這也可以是當前農業試驗研究面臨的重點課題，值得農政和農業試驗研究單位重視與加強。

## 貳、水分在農作物體內的生理功能

一般而言，在作物代謝旺盛的器官(如嫩葉、嫩果等)含水量較高，在生理活性薄弱的器官(如種子、孢子等)則含水較少。作物細胞各種生化反應幾以水為介質或溶劑才能進行，所以必須在充足水分含量下，原生質才能正常進行各項生理活動。其次，水還可以維持細胞膨壓，使細胞伸長、膨大，植株才能挺立、開展葉片，承受陽光進行光合作用。缺水導致膨壓降低時，這些生長現象即減緩或停滯。

水也是光合作用的基本原料之一，可見光和紫外光的能量經葉片上的葉綠體吸收啟動光合作用，經由水解反應展開各項生化、生理活動，並釋放出氧氣供需氧性生物進行呼吸之用。又水的高汽化熱(20°C時為 $2,454 \text{ J g}^{-1}$ )及高比熱( $4.187 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )的物理特性，有利於發散植體自外界環境所吸收的輻射熱(能)，避免體溫大幅上升造成負面危害。再者，水的表面張力、內聚力及吸附力在植體內的運輸作用中更具有重要意義，帶動植體內化合物的循環。水分子的極性，亦可使許多化合物形成水合狀態，使原生質膠體維持穩定，在維繫植體

各項機能上扮演關鍵角色(Gardner *et al.*, 1985)。經由上述，水的重要性及必要性可見一般。

## 參、植體水分狀態的估測方法及指標

為利於水資源有效管理並使植株在良好環境下生長，如何簡捷而準確的測定植體內的水分狀態，俾適時供給水分提供作物生長以節約用水，實為農作物生產及水資源管理與利用的一大要項。

### 1. 外觀形態徵狀

植體內水分狀態可以根據農作物植株外觀、形態來監測或估測，此種方法通常藉由特定的徵狀表現作為辨識指標，如嫩芽變紅、葉色轉為濃綠、葉片捲縮、葉片角度改變、葉片韌性增加等，均是常用的判斷徵狀(楊及張，1991)。這些利用外觀形態的辨識方法簡便易行，但準確性較差、主觀性強。

### 2. 水分潛勢

準確性較佳的植體水分辨識指標，多以檢驗植體的生理狀態為主，如葉片(細胞)水分潛勢及氣孔開度等，均可明確表示植體內的水分平衡狀況。水分潛勢或簡稱水勢(water potential,  $\Psi_p$ )的概念於1938年時由Meyer所提出，為作物植體內或土壤中水分能量狀態的最佳指標，其數值乃指與純水化學勢間的下降量。Meyer以擴散壓差(diffusion pressure deficit, DPD)的概念表示細胞置於純水中水分經由擴散進入細胞之壓力，以 $DPD = OP - TP$ 表示，式中OP為

細胞內容物滲透壓(osmotic pressure)，TP為細胞內的膨壓(turgor pressure)，三項壓力名詞均為正值，此一概念被廣泛應用達20年之久。1960年Slatyer and Taylor以熱動力學為基礎，利用水分自由能量之損失來說明植體內水分之流向，將水勢( $\Psi_p = \Psi_s + \Psi_p$ )以滲透勢(osmotic potential,  $\Psi_s$ )及壓力勢(pressure potential,  $\Psi_p$ )的和來表示，植物細胞中 $\Psi_s$ 與 $\Psi_p$ 為負值， $\Psi_p$ 通常為正值。但對於植體木質部，處於蒸散狀態下其 $\Psi_p$ 多呈負值。這套理論使得不論是土壤或植體的水分狀態，均可依據熱動力學的基礎以水勢進行討論。水勢的量測方法甚多，如組織重量變化法(tissue weight-change method)、溫差熱電偶乾濕球濕度計測定法(thermocouple psychrometry)、冰點降低法(cryoscopic method)、初發原生質分離法(incipient plasmolysis)及用於測量樹液或莖液的壓力室法(pressure chamber)等，可分別適用於不同狀況下進行水分潛勢的量測(Tai and Zeiger, 1998)。

### 3. 其他方法

除了測量植體水勢之外，還有在樹液流中設定指標以測定野外樹木的樹液流速度的熱脈衝波(heat pulse)法、依據植體直徑變動間接估算水勢的莖直徑測量法(stem diameter measurement)等(黃，2000)，可供利用於評估植體水分狀態。

惟不論是形態指標、量測植體水勢或氣孔開度，這些方法雖然簡單容易，但結果的取得仍然太慢或僅止於在實驗室使用，無法快速而大面積的反應植體或族群植被的水分狀態。

Tanner(1963)提出以冠層溫度作為植物

缺水指標後，冠層溫度法成爲診斷作物水分狀態的一項重要技術。30多年來研究人員相繼提出冠層溫度變異法、參考溫度法、冠層與氣溫差法(stress days degree)及作物缺水指標法(crop water stress index)等，皆以植冠(植被)的溫度爲基礎(Penuelas *et al.*, 1992, 1993)。這些診斷方法雖然具有快速而大面積估測的特點，但是容易受到環境的影響，有時候溫度差異不足以說明農作物水分在時間及空間上隨著環境的巨大變化。

近年來，隨著分光光譜解析度的提升，許多研究也顯示農作物植體水分狀態的變化與其光譜反射率(比)間具有密切的相關性，使得利用光譜檢測作物水分的可行性增高。由於光譜遙測技術具有快速、方便並且可以大面積反應植體或族群植被狀態的優點，對於農作物的水分管理與利用將會有相當助益。

## 肆、作物植株葉片反射光譜

大氣層外的太陽光經大氣層中的水汽、二氧化碳、臭氧及其它微塵粒子的攔截吸收或反射後，到達地面的光輻射大部份爲可見光與近紅外光及少量的紫外光，其他波長的光輻射則微不足道。以能量分佈來說，主要是在狹窄的可見光波段(約佔50%)，其他則爲紫外光(約佔7%)、紅外光(約佔43%)。液態水分對太陽光輻射有很高的吸收率，Curcio and Petty (1951)曾指出水分的吸收光譜在760、970、1190、1450及1940 nm有較高的吸收現象。惟在植體內，太陽光遭受不同物質及構造的影響，其吸收光譜往往有不同的表現，在紅外光區尤甚，依不同作物有別。

太陽光是地球上絕大部分生物能量的來源，以農作物來說，太陽輻射接觸到葉片後，主要有反射(reflect)、吸收(absorb)及穿透(transmit)等三種運動方式，不同波段光譜進入葉片後的作用方式各異。這些輻射光能進入植體後，主要受細胞色素、水分、細胞間隙、細胞壁及其它生物物質的影響而改變運動方式，不同作物也會因爲葉片構造及組成分的不同造成反射光譜各異。其中，可見光光譜(400-700 nm或400-740 nm)及短、中波紅外光波段(700-3000 nm)明顯受植體內部生理狀態的影響，這些生理狀態主要是隨著葉片葉綠素含量、葉片構造及水分含量的改變而變化(圖1)。

葉片光譜中，可見光波段部分主要受植體內的細胞色素的影響。在綠色葉片中，由於葉綠素的強烈吸收利用，而呈現低反射率及低穿透率。眾所周知葉綠素吸收紅光及藍光以進行光合作用，葉綠素含量愈高，反射率愈低；相對而言，葉綠素對於可見光綠光部位的吸收甚少，這也是植物葉片表現出綠色的原因。當葉片遭受環境逆境或生理老化時，葉綠素衰解含量緩慢降低，類胡蘿蔔素及葉黃素成爲葉片中的主要色素，吸收藍光而反射綠光及紅光，綠光及紅光綜合表現的結果則呈現出黃化徵狀。

與可見光相較之下，近紅外光波段(700-1300 nm)的能量較低，無法被細胞色素吸收以利用於光化學反應，而表現出高反射率及高穿透率的光學行爲，其實際的吸收、反射或散射的比率因不同作物種類或不同葉片構造而異。1971年Woolley發現大豆葉片對於日射光的近紅外光波段僅吸收4%，其餘96%遭受反射或穿透。Sinclair *et al.* (1971)也曾指出葉內構造是影響植體

內近紅外光光譜反射的主要因素，其中細胞間隙、細胞壁的反射，大幅降低了近紅外光光譜的吸收率。楊及蘇(1997)在水稻的研究上，亦發現水稻之反射光譜表現類似於上述，呈現典型綠色植物的反譜。

介於1300-3000 nm的短、中波紅外光波段受葉內水分影響最大(Carter, 1991)，其反射率較近紅外光波段為低。主要被水分吸收而呈現低反射比，其次則是葉內其它生化物質含量的影響(Gao and Goetz, 1994)，如木質素、纖維素、澱粉及蛋白質等。當葉片水分變化時，1450、1940及2500 nm的光譜表現甚為敏感。

由前述可知，植體中的水分也會吸收照射到葉片的光輻射，而減低其光譜反射率，水分對光譜的吸收主要發生在短、中波紅外光區，但其影響也延伸到可見光區，惟不若葉綠素般強烈，例如可見光區雖然有葉綠素的干擾，但在480及680 nm部

位附近也有對水分敏感的表現。

因此，農作物葉片光譜與葉內水分狀態有一定之相關性，若能利用植物光譜分析技術，在農作物發生肉眼可見水分逆境徵狀之前，早期預估植株所處的逆境狀態，將有助於及時對農作物進行適當水分管理而減少水分逆境對農作物的傷害，避免遭受經濟上的損失。

## 伍、田間農作物植被反射光譜

另外，以田間農作物植被而言，植被光譜反射率(比)是田間作物植株與栽培環境的綜合表現，反射光譜曲線為包含正常、處於逆境或老化的葉片、莖稈、花、子(果)實、土壤背景及田間灌溉程度等光學特性的混合結果，其中以綠色葉片影響最大。作物植被中葉片層層疊疊，相互遮蓋，其光譜反射曲線與單一葉片當然有所差異。

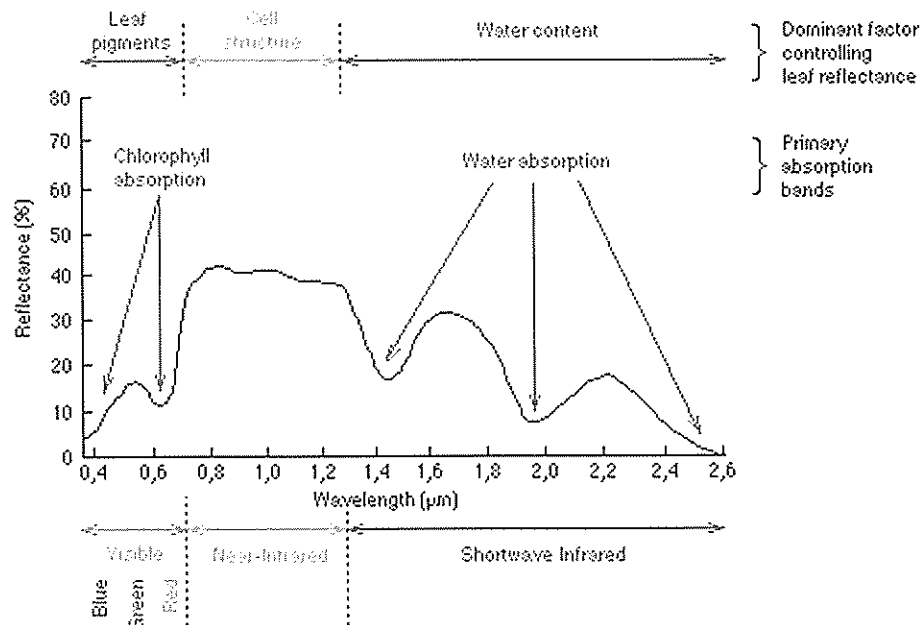


圖1. 各性狀在綠色植體中的光譜表現模式。(摘取自University College London, Department of Geography, Staff Homepages, <http://www.geog.ucl.ac.uk/>, 2001)

Wolley(1971)以大豆為材料，量測不同波段光譜(450-2700 nm)在不同葉片數量下的反射比變化，結果發現重疊葉片數愈多，光譜反射比在可見光波段(450-800 nm)愈低，近紅外光波段(800-2700 nm)段愈高，但可見光波段反射比降低的程度很小，近紅外光波段反射比增加甚多，惟葉片數量與光譜反射比間的關係並非直線相關。Hoffer(1978)指出，植被光譜近紅外光波段反射比較高的原因是因為穿透上方第一層葉片的近紅外光，在接觸第二層葉片後，有某些部份反射回第一層葉片的原因(圖

2)。

此外，在作物生育的不同階段，由於田間狀態的變化如土壤翻耕、萌芽、生長、開花、結實及老化，光譜曲線的呈現方式均有不同。甚至不同作物種類的葉片角度差異以及季節變化的太陽入射角度，都會造成太陽輻射與葉片接觸時角度的改變，進而影響光譜反射率(比)的變化。因此，田間作物所處環境中各種會影響田間作物植被光譜反射曲的因素，均是在進行田間遙測時所應考慮的因素。

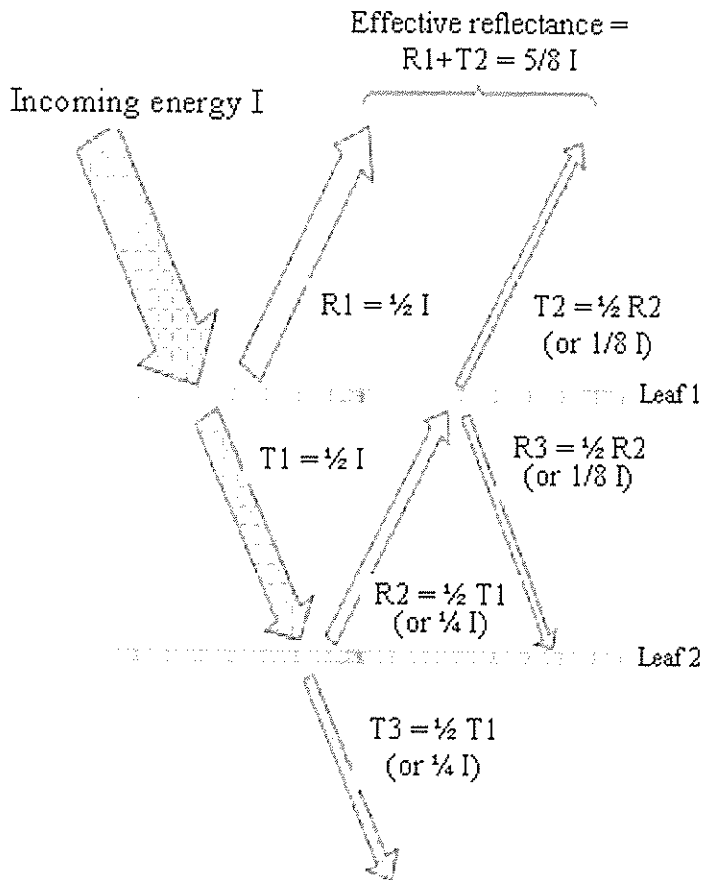


圖2. 植體多層葉片對植被近紅外光反射率的影響。(I=Incoming energy, T=Transmitted energy, R=Reflected energy. 摘取自Hoffer, 1978)

## 陸、植被光譜特徵與植體水分狀態的關係及其利用

由於遙測技術對於田間作物的水分管理與利用具有很大的助益，為使農作物光譜分析技術應用到田間水分管理與利用上，許多學者開始深入瞭解植體光譜與水分狀態的關係，並致力於植被光譜特徵與作物水分狀態間關係的建立。

Thomas *et al.* (1971)利用充滿膨壓的棉花葉片令其逐漸缺水乾燥，以觀察葉片光譜在400-2500 nm間反射率變化情形，發現當膨壓降低，則葉片光譜反射比增加。但是不同光譜波段的增加趨勢並不一致，其中以可見光部位的增加程度最小，且當相對膨壓降到70%以下時，可建立模式以估測棉花葉片水分。Jackson(1985)也指出，缺水棉花的光譜表現與常態非缺水狀態下明顯不同。Ripple(1986)利用菜豆進行植被覆蓋率、葉片相對水份含量及葉片水分潛勢的改變對於葉片光譜反射率的影響研究。結果指出，紅光部位(630-690 nm)的反射率對於相對水分含量及植被覆蓋率均甚為敏感；近紅外光部位(760-900 nm)與植被覆蓋率顯著相關，但與相對水分含量相關性甚低；而中波紅外光部位(2080-2350 nm)則與植被覆蓋率及相對水分含量有高度相關；葉片水分潛勢則對紅光及中波紅外光有高度相關。Michio *et al.*(1989)也曾以960 nm處的倒數光譜監測水稻的缺水狀態。Penuelas *et al.*(1993)利用R970 nm/R900 nm比值作為小麥水分狀態的指標。

隨著分光光譜解析度的提升，豐富而詳細的光譜資料可以提供作物在缺水時的各光譜波段的實際變化，加速了光譜與植

體水分狀態的研究。近年來，也逐漸利用高解析光譜資料發展出數種指標以檢測農作物葉片或植被的水分狀態。

### 1. 植體健康狀態指標

理想的農作物應含有充足水分及高葉綠素含量的大形葉片，俾利於發揮生長潛力。農作物綠色植被反射光譜中，對可見光部分之紅光波段吸收最強，因此紅光波段的反射率(比)最低，當紅光波段反射率愈低，顯示單位土地面積內的葉綠素含量愈高。近紅外光波段反射率主要受葉內構造、植被結構及植被覆蓋率的影響，當細胞膨壓增大，葉內細胞壁及細胞間隙對近紅外光的反射愈強，植被結構愈複雜，覆蓋率愈高，近紅外光的反射率也會增高(Hoffer, 1978)。所以，具有高近紅外光反射率(NIR)及低紅光反射率(RED)的作物反射光譜，代表其族群擁有較佳且健康的綠色植被覆蓋率。Jordan(1969)以RVI(ratio vegetation index, 植被指數比)作為作物植株健康與否的指標：

$$RVI = NIR / RED$$

當RVI值愈高，顯示代表高植被覆蓋率的NIR較大，而代表高光合作用率的RED較小，因此綠色植被覆蓋率高且光合作用旺盛。高RVI值又隱示植被膨壓高而生長旺盛。然RVI的值並無界限，其發散邊區不易進行比較，因此Rouse *et al.*(1974)提出NDVI(normalized difference vegetation index, 標準差植被指數)以取代RVI。基本上NDVI與RVI在功能上是相同的，只是值的範圍不同，NDVI值介於+1至-1之間，數值收斂易作比較。



$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

NDVI的範圍：綠色植體  $0 < NDVI \leq 1$ ，土壤： $0 \leq NDVI \leq 1$ ，水分： $-1 \leq NDVI \leq 1$ 。事實上NDVI是一個物質光譜狀態的綜合指標，被廣泛使用在反應綠色植體、土壤及水分的實際狀況。以植體水分來說，NDVI愈大，則植體水分含量愈高。Yang and Su(2000)也曾指出，水稻NDVI與土壤水分潛勢間具顯著相關，當土壤缺水程度愈高，水稻植被的NDVI值愈低，可利用NDVI間接了解作物水分狀態。

## 2. 單一特徵波長與植體水分狀態的關係

由於葉片水分潛勢對紅光及中波紅外光有高度相關(Ripple, 1986)，在其它研究文獻中也發現，農作物植體在760、970、1190、1450、1650、1900、1940及2250 nm附近的光譜反射率可反映植物的水分狀態(Curran, 1989; Danson et al., 1992; Gao and Goetz, 1994; Raymond and Roger, 1999)。

如能利用單一特徵波長即可建立與水分狀態的相關性，並進行水分狀態的估測，將具有甚高之實用性。

Yang and Su(2000)在水稻生育期間進行不同土壤缺水等級對水稻族群植被光譜的影響研究，將水稻田間土壤水分含量自正常供給降至-1.60 MPa，並量測缺水過程中植被在350-2400 nm光譜範圍的反射比。發現植被光譜反射比與不同缺水等級進行直線相關分析後，相關係數(correlation coefficient, r)在不同波段的表現呈現不同趨勢(圖3)。不同波段反射比與土壤水分潛勢之關係，呈現不等程度之負相關。若將植被光譜範圍分為可見光(350-740 nm)、近紅外光(740-1300 nm)、短波紅外光(1300-1800 nm)及中波紅外光(1800-2400 nm)等四個波段後，各波段中最佳相關係數分別為-0.90(6973nm)、-0.63(1177 nm)、-0.95(1508 nm)及-0.98(2114 nm)。顯示經由水稻植被光譜單一特徵波長(以2114 nm為佳)的反射比值，即可估測田間土壤水分潛勢，作為灌溉與否的依據。

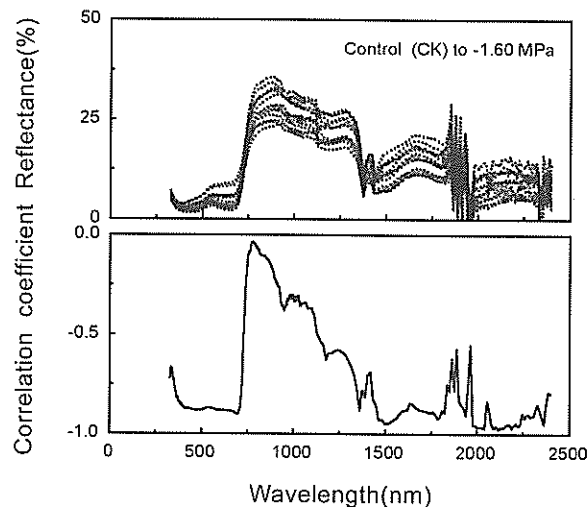


圖3. 土壤缺水逆境下的水稻植被光譜(350-2400 nm)反射比及其與土壤水分潛勢之相關係數。(摘取自Yang and Su, 2000)

### 3. 植體水分狀態之光譜指標

Penuelas *et al.* (1993)指出，以單一葉片來說，1300-1500 nm波段的反射率對葉片水分有高度的敏感性，但當植體全株或族群植被水分吸收強烈時，其光譜表現相差甚小，可能不適用於準確測量植體或植被水分狀態，因此提出對水分吸收敏感度稍弱的950-970 nm波段取代。在此近紅外光波段，當水分吸收強烈時，能夠表現出植體內水分狀態的差異，並進一步將970 nm與水分不吸收但與葉片構造有直接相關的900 nm做一比值PWI(plant water index,  $R_{970}/R_{900}$ )，作為估測植體水分的指標，顯示出PWI與植體相對水分含量、葉片水分潛勢、氣孔導度及細胞壁彈性的改變均有相關性存在 (Penuelas *et al.*, 1996)。Penuelas *et al.*(1997)報告再指出，PWI的倒數WI(water index)經NDVI的標準化後(WI/NDVI)，其與植體水分的相關性更高。惟WI在LAI(leaf area index)高度變化的情形下，仍無法顯現整體植被的水分差異。Champagne *et al.*(2001)發現隨著植株的生長，植被水分吸收波長敏感波段(trough)由940 nm逐漸移轉到980 nm(圖4)，

940 nm對單一葉片的水分吸收太弱，無法表現此一現象。另又指出WTI(water trough index)在LAI呈現變異的情形下，與植被的葉片水分含量有高度相關：

$$WTI = R_{900} / R_{(\min\ 940-980)}$$

由於WTI並無法去除植冠內部結構的干擾，使得WTI與LAI之間的關係仍有差異。故若要以WTI作為植物水分逆境的指標，則必須將其標準化。

## 柒、結語

田間水管理與利用是農作物栽培生產過程中相當重要的一環，如何適時適法的供給田間作物適量的水分，兼顧作物生產需求及水資源有效利用，是世界各先進國家積極探討的課題。對於水資源有限的臺灣地區，各方分從不同的立場及角度提出對農業用水的見解，一直引起喋喋不休的爭議。農業部門的最佳因應對策，就是加強農作物生產的水管理與利用相關研究，找出各方均能接受的策略以求充分而有效的運用寶貴水源。

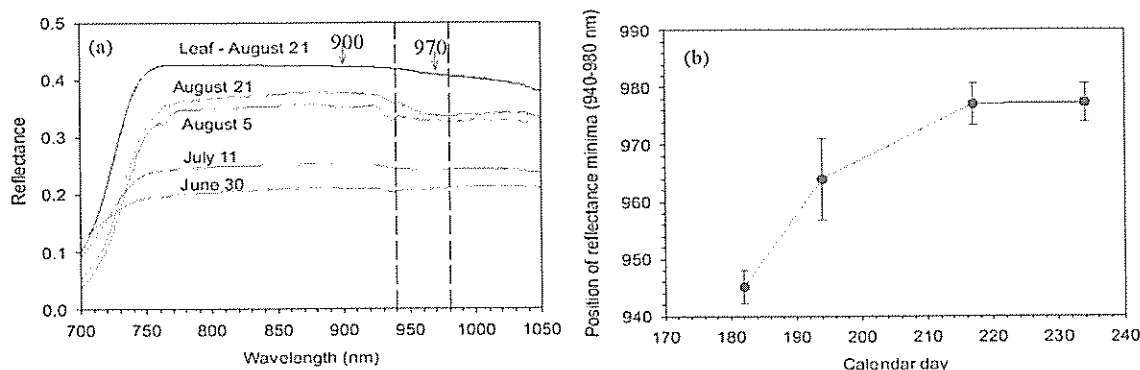


圖4. (a)植體水分變化與植被光譜曲線的關係。(b) 植被水分吸收波長敏感波段(trough)隨著生育進展的變化情形。(摘取自Champagne *et al.*, 2001)

本文回顧部分文獻，於文中陳述一些可以作為應用的研究結果，特別提到近年來光譜遙測技術在作物水分狀態估測上的研究進展。由於農作物葉片及植被的光輻射反射率(比)主要隨著葉片的生化組成與物理結構而改變，其反射光譜及光譜特徵之篩檢與利用有其學理基礎。而且光譜遙測的非破壞性、快速及大面積監測特點，以及高時效性優點，具有相當的實用潛力，可以進行田間農作物水分狀態的估測與診斷。然而除了近地面遙測平台之外，航空及太空遙測平臺受環境影響甚大，空氣中的水汽及微塵、感測器的觀測角度、太陽光輻射的入射角、以及地理幾何校正等，均會造成遙測的干擾，在真正論及應用前必須解決。

### 捌、參考文獻

- 黃彥三。2000。樹木水分狀態及樹冠截雨效應非破壞連續監測技術之研發。林業研究專訊第35號。  
<http://www.tfri.gov.tw/news/35/6.htm>。
- 楊純明、張富洲。1991。水稻逆境之探討。科學農業39(9-10):219-224。
- 楊純明、蘇慕容。1997。水稻植冠反射光譜之分析。中華農業氣象 4:87-95。
- Carter, G.A. 1991. Primary and secondary effects of water concentration on the spectral reflectance of leaves. *Amer. J. Bot.* 78: 916-924.
- Champagne, C., P. Elizabeth, B. Abdou and B.S. Ian. 2001. Mapping crop water stress: Issues of scale in the detection of plant water status using hyperspectral indices. *Agriculture and Agri-Food Canada, Canada.*
- Curcio, J.A. and C.C. Petty. 1951. The near infrared absorption spectrum of liquid water. *J. Opt. Soc. Amer.* 41:302-304.
- Curran, P.J. 1989. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens. Environ.* 30: 271-278.
- Danson, F.M., M.D. Steven, T.J. Malthus and J.A. Clark. 1992. High-spectral resolution data for determining leaf water content. *Intl. J. Remote Sens.* 13:461-470.
- Gao, B. and A.F.H. Goetz. 1994. Extraction of dry leaf spectral features from reflectance spectra of green vegetation. *Remote Sens. Environ.* 47:369-374.
- Gardner, F. P., R.B. Pearce and R.L. Mitchell. 1985. *Physiology of crop plants.* p.76-91. The Iowa State University Press, Iowa, USA.
- Hoffer, R.M. 1978. Biological and physical considerations in applying computer aided analysis techniques to remote sensor data. p.227-289. In: *Remote Sensing: the Quantitative Approach.* P.H. Swain and S.M. Davis, eds., McGraw Hill, New York.
- Jackson, R.D. 1985. Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *Intl. J. Remote Sens.* 6:177-185.
- Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50:663-666.
- Michio, S. and A. Tsuyoshi. 1989. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to

- LAI and above-ground dry phytomass. *Remote Sens. Environ.* 27: 119-127.
- Penueles, J., R. Save, O. Marfa and L. Serrano. 1992. Remote measured canopy temperature of greenhouse strawberries as indicator of water status and yield under mild and very mild water stress conditions. *Agric. For. Meteor.* 58:63-77.
- Penueles, J., I. Filella and C. Biel. 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *Intl. J. Remote Sens.* 14:1887-1905.
- Penueles, J., I. Filella, L. Serrano and R. Save. 1996. Cell wall elasticity and Water Index (R970 nm/R900 nm) in wheat under different nitrogen availabilities. *Intl. J. Remote Sens.* 17:373-382.
- Penueles, J., J. Pinol, R. Ogaya and I. Filella. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI(R900/R970). *Intl. J. Remote Sens.* 18:2869-2875.
- Raymond, F.K. and N.C. Roger. 1999. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sens. Environ.* 67: 267-287.
- Ripple, W.J. 1986. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 52(10):1669-1675.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1-371.
- Slatyer, R.O. and S.A. Taylor. 1960. Terminology in plant-soil-water relations. *Nature* 187:992-924.
- Tai, L. and E. Zeiger. 1998. *Plant Physiology*. p.72-75. The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc., New York.
- Tanner, C. B. 1963. Plant temperature. *Agron. J.* 50:210-211.
- Thomas, J.R., L.N. Namken, G.F. Oerther and R.G. Brown. 1971. Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agron. J.* 63:799-802.
- Sinclair, T.R., R.M. Hofer, M.M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. *Agron. J.* 63:864-868.
- Woolley, J.T. 1971. Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiology* 47:656-662.
- Yang, C. M. and M. R. Su. 2000. Analysis of spectral characteristics of rice canopy under water deficiency. p.13-18. In: *Proceedings of the 21st Asian Conference on Remote Sensing*. Vol.1. Dec. 4-8, 2000. Taipei, Taiwan.

# Crop Water Status and Applications of Spectral Remote Sensing

Rong-Kuen Chen and Chwen-Ming Yang

Department of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute,  
Taichung Hsien, Taiwan (ROC)  
E-mail:cmyang@wufeng.tari.gov.tw

## Abstract

Water resource management and application is the crucial element in the success of farming. The key point for crop cultivation is the provision of adequate amount of irrigation water with the right way in the right time. Thus, crop production may be able to meet the food demand as well as to fit the requirement of effective water use. These issues are important to the developed countries including Taiwan. This paper reviews the literature in the related areas to give suggestions for both policy making and research sectors. It is hoped that spectral remote sensing technology may be more vigorously pursued and applied in the near future for the benefit of water resources management and application.

**Key words:** Spectral remote sensing, Water resource, Water management and application, Water status, Reflectance spectrum.

