

作物生長模式推估缺水敏感參數之研究

Parameters for Water Deficit Sensitivity in Crop Models

台灣大學生物環境系統工程學系
助理教授

陳增壽

Tzen-Show Chen

台灣大學生物環境系統工程學系
博士後研究員

糠瑞林

Jui-Lin Kang

台灣大學生物環境系統工程學系
教授

林俊男*

Chun-Nan Lin

摘 要

作物之生長模式可以提供作物生長與環境關係之模擬，可以節省大量田間試驗之時間、人力與資源，累積資料作為後續與管理之相關研究的基礎，以往簡單之作物產量模式，可回答作物蒸發散量與產量之關係，但是其缺水敏感參數推估不易，甚至有學者認為是適用性不佳。但複雜的作物生長模式往往涉及大量如作物遺傳、地質條件、灌溉管理、耕作方式與氣象資料等參數，雖可較準確的模擬作物的生長過程，包括進入各生長期的時間、乾物質的累積量、葉面積指數與產量等數據，但是模擬模式建立、參數校正與驗證均不容易。本研究的目的在校正與驗證作物生長模式，並利用作物生長模式推估作物產量模式的缺水敏感參數，以建立一般農民可以使用的簡單模式，決定適當的乾旱管理策略，亦可將作物產量模式整合到區域用水規劃或管理決策支援系統，回答農業用水調整對作物產量之影響，作為區域用水調整之決策參考依據。

關鍵詞：作物模式，缺水敏感參數，水資源管理。

ABSTRACT

The growth of crop can be simulated by a well designed crop model. Such model usually need crop cultivar information, weather, soil, irrigation management, and so on. To calibrate and verify this crop model is a tough work. Therefore, the crop model can't be applied widely.

Crop yield model is a simple model. The crop yield is a function of evapotranspiration. It is a useful model, if the water deficient sensitive factor of a yield model was given properly. Unfortunately, this factor was variant because of different crop cultivar and cultivating location. Some study even declare that the factor can not be estimated

*通訊作者，台灣大學生物環境系統工程學系教授，106 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，lcn@upland.ae.ntu.edu.tw

(Ritchie, 1998).

In this paper, the parameters of a crop model were calibrated and verified. A methodology was proposed to estimate the water deficient sensitive factors of the crop yield model by using this crop model. It made possible that making irrigation schedule by crop yield model or integrating crop yield model into a decision support system of water resources management.

Keywords: Crop model, Water deficient sensitive factor, Water resources management.

一、前言

灌溉可以降低作物產量對天然降雨與氣象之依賴度(Bogges and Ritchie, 1988)。台灣耕地受灌面積約 85 萬，其中水稻佔 54%，(耕地面積與農業人口，2003)。台灣年計畫用水量 178 億噸，農業灌溉用水一年約 106.32 億噸，約佔計畫用水量之 59.7%，且以水稻為主要之施灌對象(蔡明華、陳益榮，2000)。水稻每一期作之蒸發散量總和約為 600-700mm(農田水利教材，1998)，一旦發生乾旱缺水無法耕作，對水稻生產與農民生計均會發生重大的影響。

農業灌溉用水缺乏時，可以採取停灌休耕、降低灌溉水量等方式因應，雖然會影響作物產量，但不至於完全沒有收穫。目前已知作物在不同生長時期，對缺水的敏感度並不一致，例如水稻若在開花結穗期缺水，對產量的影響會大於分蘖期缺水的影響，描述作物產量與蒸發散量關係的模式，即所謂的作物產量模式(Yield Model, DeWit, 1958)。作物產量模式是一個簡單模式，且對作物產量與蒸發散量關係的行為描述有許多假設，簡化之模式有助於瞭解基本反應，但是在應用時應該瞭解簡化模式之限制，有時候簡單通用的模式因為太簡單，必須對每個新的區域作校正，這些參數變成區域性或某特定年之特定參數，無法沿用到其他區域。

作物學家將作物的生長過程利用電腦模擬建立模式，近年來已有許多作物生長模式(Crop Model) 逐漸發展完成，並應用在研究生長歷程或是作物對環境與管理等因素的反應，作物生長模式可以用來研討作物管理與政策之相關議題

(Boote et al., 1996)。其間並有許多發展作物模式的團體嘗試利用長期的氣象資料進行水與氮肥管理的最佳化(Hood et al., 1987, Aggarwal and Kalra, 1994)，這些最佳化的研究成果可以提供長期灌溉施肥策略之建議。

簡單的作物產量模式雖然單純，但因為簡單的作物產量模式無法適切的描述生長歷程間的變化與其影響，對較深入之研究並不適用；但複雜的作物生長模式對部分實務應用也有困難，因其可能需要一些無法或不易從實際田間操作中量測獲得的輸入資料；且複雜的模式較不容易被瞭解，也會造成使用與應用之困難，如要研討處理灌溉管理之最佳化策略問題，使用相對簡單且需求參數較少的模式會比較適用。

本研究的目的在校正與驗證一個較複雜的作物生長模式，然後利用此一作物生長模式推估作物產量模式的缺水敏感參數，使較簡單之作物產量模式可以提供一般農民使用於決定適當的乾旱管理策略的實務上，亦可將作物產量模式整合到區域用水規劃或管理決策支援系統，研討農業用水調整對作物產量之影響，作為區域用水調整決策參考之依據。

二、文獻回顧

2-1 乾旱對水稻產量之影響

水稻各生育期的需水量不同，在抽穗期前後的需水量最低，穀粒充實後，需水量則增加，缺水對水稻生育與產量有嚴重的影響，其影響程度決定於(1)在那個生育期缺水，(2)缺水時間長短，及(3)缺水的嚴重程度 (劉麗飛，1999)。

水稻營養生長期間主要是進行分蘖與植體

生長，分蘗期間的缺水會使分蘗會受阻、株高降低，使作物產量顯著降低(陳世雄，1992)。營養生長期之後是生殖生長期(Reproductive phase)，水稻生殖生長期間可分為幼穗分化期、孕穗期與抽穗期，幼穗分化期與抽穗期對水分逆境反應最為敏感，是決定水稻產量之重要階段。水稻進入生殖生長期時，有效分蘗已經固定，產量會受每穗穎花數、稔實率與粒重之左右；Namuco and O'Toole (1986)指出，花粉形成期間因水分逆境引起稔實率降低，是導致產量降低之主要原因；Rahman and Yoshida (1985)在開花後第三天起分別以 100%、75% 與 50% 田間含水量之土壤水分處理，並持續維持至成熟期結束，結果發現當水分低於 50%田間含水量時，產量明顯降低 16-20%。這些試驗均指出，缺水造成產量降低之主要原因是穀粒充實速率降低所致。

幼穗形成期是穎花分化與決定壹穗粒數之時期，缺水反應會影響產量構成要素之一穗粒數與稔實率(陳世雄、李建鋒，1999)。從開花後至收穫期是水稻成熟期(Ripening phase)，水稻成熟期是稔實率與粒重之決定時期(張英勝，1995)。因為水稻穀粒充實期是光合作用產物急速累積的時期，此期間缺水對產量構成要素之稔實率與千粒重會有重大影響(Cruz and O'Toole, 1984)。

2-2 作物產量模式

一般作物學家認為作物光合作用生長的歷程與蒸散量息息相關(Boyer and McPherson, 1975)，因為作物藉由呼吸作用吸入二氧化碳行光合作用，並將水分由氣孔排出，兩者關係密切。所以作物產量以蒸散率推估產量是合理的，作物產量模式最早是 DeWit (1958)提出，其模式如式(1)所示。

$$Y = \frac{mT}{E_0} \dots\dots\dots(1)$$

其中：Y : 作物產量
 T : 作物蒸散量
 E₀ : 平均自由水面蒸發速率
 m : 作物係數

一般作物通常有不同的生長期，且發生在不同生長期之缺水對作物產量之影響程度並不一致，Jensen (1968)提出另一個作物產量模式，如式(2)所示：

$$\frac{Y}{Y_p} = \prod \left(\frac{T_i}{T_{pi}} \right)^{\lambda_i} \dots\dots\dots(2)$$

其中：Y : 作物產量
 Y_p : 作物潛勢產量
 T_i : 作物第 i 個生長階段之蒸散量
 T_{pi} : 作物第 i 個生長階段之潛勢蒸散量
 λ : 作物缺水敏感參數

對於牧草或苜蓿等青割作物，一般指需要計算累積生產之乾物重，則可以將上列公式簡化，因此 Hanks(1974)提出如式(3)之作物產量模式。

$$\frac{Y}{Y_p} = \frac{T}{T_p} \dots\dots\dots(3)$$

其中：Y : 作物產量
 Y_p : 作物潛勢產量
 T : 作物蒸散量
 T_p : 作物之潛勢蒸散量

以上之作物產量模式均不適用延遲耕作，因為即使蒸散量高，作物產量仍會偏低。Hill(1979)認為這是因為作物累積乾重不足，所以提出季節長度因子(Season Length Factor, SLF)，如式(4)與式(5)所示。

$$SLF = 1.0, \text{ if } T_p \geq T_{pth} \dots\dots\dots(4)$$

$$SLF = \left(\frac{T_p}{T_{pth}} \right)^{\alpha}, \text{ if } T_p < T_{pth} \dots\dots\dots(5)$$

其中：T_p : 作物某生長階段之潛勢蒸散量
 T_{pth} : 作物某生長階段之滿足總乾重預測之蒸散門檻值
 α : 權重

Stewart et al. (1977)分析在美國四個州不同灌溉管理制度的資料，認為作物產量模式之生長期校正只比簡單作物產量模式增加一點精確度，λ 值因為不同生長期之間的交互作用而無法直接推估，所以提出如式(6)之作物產量模式。

$$\frac{Y}{Y_p} = 1 - \beta \left(1 - \frac{ET}{ET_p}\right) \dots\dots\dots(6)$$

其中：β：作物係數

Haouari and Azaiez (2001) 在土地面積、作物收益與灌溉水量之限制下考慮四種作物，探討缺水狀況下之最佳作物制度，研究中引用如式(7)之作物產量模式作為缺水狀況下推估產量之依據，顯示作物產量模式之實用性，不過其論文中部份數據系引用其他論文之虛擬數值，且作物係數 K_y 亦出現大於 1 之不合理現象。

$$\frac{Y}{Y_p} = \prod (1 - K_{y_i} (1 - \frac{ET_i}{ET_p})) \dots\dots\dots(7)$$

式(2)之作物產量模式是比較常用的模式，例如 Rasmussen and Hanks (1978)發展之作物生產模式應用在春小麥灌溉管理上，但每一個生長時期的 λ 值乃是以經驗判斷均定為 0.25。Kanemasu and Rasmussen (1978)則修正前述之 λ 經驗值，於第三個時期給予較高的權重，與關鍵生長時期的認知相互配合。Hill, Johnson, and Rayn (1979)以田間試驗資料建立大豆產量模式，提出三組不同回歸參數 λ 之產量模式，第一、二個生長期之 λ 值皆定為零，而最後一個生長階段則有較高之權重，顯示關鍵生長期缺水對作物之影響較大。

前述田間試驗均發現，式(2)之作物產量模式對於過晚種植之作物產量預測結果不佳，可能是因為沒有足夠的時間累積作物乾重，所以式(2)適合應用在作物正常期間種植之灌溉管理。從作物乾旱處理的試驗結果分析，作物不同生長期缺水對產量影響甚鉅，但田間試驗取得資料不易，本研究即嘗試利用作物生長模式推估作物產量模式之 λ 值。

三、研究方法

利用作物生長模式預測產量與灌溉需求可以應用在區域或集水區灌溉用水規劃(Hook, 1994)，但是因為多數作物生長模式過於複雜，需要輸入之參數太多，有實際應用上的困難。而灌溉管理者首先關心的是作物產量與水量之關係，因此作物產量模式應是簡單而適當的，只是

有參數 λ 的推估不易，所以本研究嘗試先校正與驗證作物生長模式後，再利作物生長模式產生資料作為推估作物產量模式中 λ 參數之基礎。

本研究選用的作物生長模式是包括在 Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)軟體，DSSAT 包括(1)Data Base Management System (DBMS)用來輸入、儲存與使用最小資料集(Minimum data set)，(2)作物生長模式庫，有大豆、玉米與稻作等作物生長模式，(3)長期作物模擬分析與結果展示程式。決策支援系統(DSS)是發展來作為情境是決策之工具，主要在經由回答“如果...”(What if ...)的情境模擬過程中，累積決策之經驗與知識，達到提昇決策效能之目標。在農業生產上，氣候、土壤、作物品種、蟲害與作物管理的變更，均會影響作物生產，也是被關心的變化因子，所以使用者可根據需求操作輸入變數，但也因為需要輸入的變數眾多，而使得模式不容易驗證、校正與使用。

DSSAT 中任何一種作物均有數個品種可供選擇，資料庫之品種遺傳參數與實際耕種作物不符合時，可自行輸入遺傳參數或是利用現有品種與 DSSAT 所發展之推估模式，輸入耕作作物之觀測值計算遺傳參數。DSSAT 中計算蒸發散潛勢(Potential Evapotranspiration)是利用 Priestly-Taylor method，或是 Penman method (需要每日濕度與風速資料)推估而得。

3-1 作物模式之驗證與校正

研究中利用 DSSAT 之水稻生長模式 (CERES-Rice)模擬台農 67 號之生長情況，台農 67 號是民國 67 年育種後命名之粳稻，具有產量豐富、抗倒伏之特性，對缺水環境適應性高於其他水稻。根據行政院農業委員會農業試驗所全球資訊網(Taiwan Agricultural Research Institute, <http://www.tari.gov.tw/>)之資料，如果缺水發生在抽穗前 20 天至抽穗後 10 天期間，將嚴重減損稻穀產量，第一期作全生育日數為 120 天，平均產量 5900kg/ha，第二期作全生育日數為 96 天，平均產量 5100kg/ha (農田水利教材，1998)。

本研究取得利用各農業改良場歷年來共 36

表 1 台農 67 號遺傳參數調整

(單位：Kg/ha)

	模擬產量 1	模擬產量 2	田間試驗產量	模式誤差
農試所遺傳參數	6303	6247	9019.6	-30.74%
修正 G1,G2,G3 參數	10397	10305	9019.6	14.25%

表 2 1986-1992 年水稻生長模擬與試驗資料表

(產量單位：Kg/ha 穀粒數單位：Grain/m²)

年	期作別		田間資料	模擬結果	模擬結果 2	模式誤差	備註
1986	1	產量	6684	7382	7297	+9.17%	寒害
		穀粒數	25128	25395	--	+1.06%	
	2	--	--	--	--	N/A	颱風
1987	1	產量	6474	8794	8693	+34.30%	輕微白葉枯病
		穀粒數	26641	28988	--	+8.81%	
	2	--	--	--	--	N/A	螟蟲、褐飛蟲、白葉枯病
1988	1	產量	6703	6871	6792	+1.33%	溫度低，受寒害較避插秧
		穀粒數	27249	23636	--	-13.26%	
	2	--	--	--	--	N/A	褐飛蟲、白葉枯病
1989	1	產量	7008	7732	7643	+9.06%	輕微熱風侵害
		穀粒數	27920	26141	--	-6.37%	
	2	--	--	--	--	N/A	褐飛蟲、白葉枯病
1990	1	--	--	--	--	N/A	褐飛蟲
		--	--	--	--	N/A	
	2	--	--	--	--	N/A	颱風
1991	1	產量	8607	7791	7701	-10.50%	
		穀粒數	36625	25523	--	-30.31%	
	2	產量	6619	6883	6804	+2.79%	
		穀粒數	27014	22551	--	-16.52%	
1992	1	產量	6767	6690	6613	-2.28%	
		穀粒數	27175	22720	--	-16.39%	
	2	產量	5580	6462	6388	+14.5%	
		穀粒數	21628	21169	--	-2.12%	

期作之試驗資料所進行 DSSAT 之水稻模式台農 67 號之作物遺傳參數之驗證與校正，其率定之參數為：310(P1)、120(P2R)、369(P5)、12.0(P2O)、25.8(G1)、0.035(G2)、0.5(G3)、11.1(G4) (林毓雯等, 2001)，利用田間試驗資料(賴明信等, 1998) 建立作物生長模擬模式，但模式模擬結果未盡理想(如表 1 所示)；本研究參考所收集之試驗報告，嘗試調整各遺傳參數值，其中 G1 是最大穗數之係數，DSSAT 參考手冊建議一般值是 55，台農 67 號為粳稻改良品種，參考 DSSAT 表列其他水稻品種，推定台農 67 號之 G1 值為 50。G2 是每粒穀粒最大重量，一般國內試驗結果，稻穀千粒重在 24-26g 之間，引此研究中乃取平均值 25。G3 是分蘗係數(Tillering coefficient)，與 IR64

品種比較，分蘗越多者，係數大於 1，DSSAT 表列一般品種 G3 大多均等於 1。不同之 G1, G2, 與 G3 對產量有影響，但對各生育期長短並不會有任何影響，調整後模式模擬的結果如表 1 所示，模式誤差比調整前略低。

本研究列出模擬產量 1 與模擬產量 2，模擬產量 1 是模式輸出結果，但是因為模式輸出之產量為含水量 14% 之每公頃稻穀重，配合國內習慣將稻穀烘乾至含水量 13% 記錄每公頃產量，重新計算出模擬產量 2，而模式誤差=(模擬結果 2-田間資料)/田間資料*100%。

遺傳參數調整後，本研究再收集台中農業試驗所台農 67 號試驗資料與氣象資料，建立多年的作物模擬模式。其結果如表 2 所示，部分期作

因為天災或蟲害而沒有試驗資料，則沒有進行模式模擬，部分期作雖有試驗資料，但仍受病蟲害影響，而這部分是作物生長模式尚無法納入模擬考慮之處，所以部分期作之模擬結果誤差較大，根據一般執行作物生長模式之經驗，認為模式模擬誤差在±5%到 15%是可以接受的(Ritchie, 1998)。

3-2 作物模擬模式與乾旱處理

本研究利用台農 67 號相關之乾旱處理文獻以建立作物生長模擬模式，檢討 DSSAT 作物生長模式是否可以確實反應乾旱處理對作物產量之影響。本研究在作物模式校正後，根據其他文獻中的作物乾旱處理相關數據與灌溉處理方式，建立模擬模式進行模式驗證。其中模擬一是模擬李健鋒等(1996)於 1993 年在台中農試所之台農 67 號二期作之乾旱處理試驗。模擬二是模擬李健鋒等(1996)於 1994 年在台中農試所之台農 67 號一期作之乾旱處理試驗。模擬三是模擬賴明信等(1998)於 1995 年在台中農試所之台農 67 號一期作之乾旱處理試驗，其結果如表 3 所示。

模擬模式之結果同常無法與田間試驗結果完全一致，又因為作物模式並非 Monte Carlo 模擬，亦無法重複模擬後再取平均值進行統計檢定，所以一般而言，模式模擬誤差在±5%到 15%是可以接受的(Ritchie, 1998)，本研究所做之模擬產量誤差在±7%之間，因此認為 DSSAT 之作物生長模式可以確實反應作物缺水對作物產量之影響。

四、結果與討論

4-1 利用作物模式推估水稻乾旱敏感指數

本研究完成前述之作物生長模式校正與驗證後，嘗試改變模擬模式之灌溉用水量來推估作物產量模式之 λ 值。詳細步驟說明如下。

首先利用台中農業試驗所 1995 年氣象資料，模擬台農 67 號一期作不同生長期缺水狀況下之產量，以推估台農 67 號水稻之缺水敏感指數。在模式操作時，因為前期缺水狀況一定會影

表 3 作物生長模式模擬乾旱處理試驗

(單位：Kg/ha)

模擬	模擬一產量	模擬二產量	田間試驗產量	誤差
1	6516	6441	6983	-7.76%
2	8311	8215	7672	7.08%
3	6702	6625	6241.9	6.14%

表 4 缺水敏感指數推估結果

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
1995	-0.006	-0.021	0.670	0.400	0.249

響後期之作物生長，進而影響作物產量，所以在推估作物缺水敏感指數時，是先模擬作物最後一個生長期缺水，其他時期不缺水的假設狀況，根據不同缺水程度與模擬作物產量之結果，可推估最後一個生長時期之缺水敏感指數，即 λ_5 ；然後再模擬第四個生長時期不同缺水量下之作物產量，再利用已推估出之缺水敏感指數 λ_5 ，代入作物產量模式，推估該前第四個生長期之缺水敏感指數，即 λ_4 ；再依次模擬第三個生長時期缺水與作物產量之關係，利用已推估出之缺水敏感指數 λ_4 、 λ_5 ，推估出第三個生長時期之缺水敏感指數 λ_3 。依此繼續推估第二與第一生長時期之缺水敏感指數 λ_2 與 λ_1 ，所得結果如表 4 所示。

根據許宗民(1983)以虎頭埤共 14 年缺水時期之資料，按稻作之生育階段實際用水量分為八階段，進行水稻產量指數與各生育階段用水量相關性之迴歸分析，發現分蘖盛期與幼穗形成至孕穗期迴歸係數極顯著，抽穗開花期迴歸係數顯著，成活期與成熟期迴歸係數不顯著。但是這並非表示整田插秧之成活期對缺水不敏感，而是因為整田後田間必然澆水，所以分析效果不顯著。另一份研究報告指出，從播種到發芽之蒸散量為零，所以 $\lambda_1=0$ ，在試驗校正中發現， λ_2 亦接近零(Wright and Jensen, 1978)。表 4 中 λ_1 與 λ_2 小於零是不合理的情況，所以應修正為 $\lambda_1=\lambda_2=0$ ，作為後續之應用。

研究中則模式模擬 1995 年任意時期缺水灌溉之作物產量比(Y/Yp)與作物產量函數計算之作物產量比，利用上述推估出來之缺水敏感指

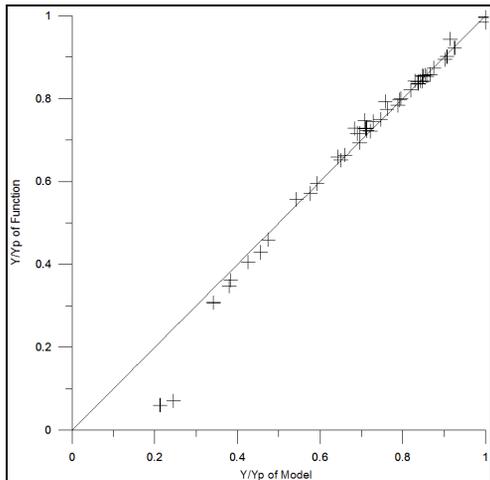


圖 1 作物生長模式與作物產量模式推估作物產量比較圖

數，結果如圖 1 所示，由圖中可看出當產量比越大，作物產量函數計算之產量比接近模式模擬之產量比。

五、結論與建議

作物生長模式經過參數校正後確可模擬作物各個生長階段的生長情況與作物產量，雖然可作為灌溉管理的工具，但是非一般農民可輕易操作使用，即使是交給專家使用，一般也必須集合農藝、灌溉、地質、氣候等各方面的專家，共同進行模式內各參數之校正與驗證，避免過度使用模式之預設值建立模擬模式，以符合田間之實際情況。

作物產量模式在適當的設定缺水敏感參數 λ 後，亦可用來推估各種缺水狀況下的作物產量，作為作物乾旱管理之依據；但以往的研究中，作物缺水敏感參數通常因為推估不易而使用經驗值，使作物產量模式之推估結果有較大的誤差，而較少被採用。本研究展示利用驗證過之作物生長模式推估作物產量模式之缺水敏感參數，可提高作物產量模式之可靠度。

作物產量模式因為是比較簡化的模式，在使用上有其限制，首先是作物產量模式不適用在晚植作物，換句話說，就是錯過正常種植期間所栽培之作物，即使充分灌溉也無法有正常的產量，

所以無法以作物產量模式推估晚植作物之缺水產量。其次，作物缺水敏感參數值除了與作物本身的遺傳特性有關之外，氣候因素也會影響缺水敏感參數值，所以可根據後續作物產量模式之需求，建立幾組區域不同氣候條件下的缺水敏感參數值或平均氣候條件下的缺水敏感參數值。

作物產量模式除了作為缺水時期灌溉管理之輔助工具外，因為作物產量模式比較簡單，亦可整合到區域用水規劃或用水管理等決策支援系統，提供農業用水調整對作物產量影響之資訊，做為區域用水調整之決策參考。

參考文獻

- Aggarwal, P. K. and N. Kalra, 1994, Analyzing the limitation set by climatic factors, genotype, and water and nitrogen availability on productivity of wheat II. Climatically potential yield and management strategies, *Field Crops Research*, 38: 93-103
- Boggess, W.G., and J.T. Ritchie. 1988, Economic and risk analysis of irrigation decisions in humid regions. *Journal of Production Agriculture* 1(2): 116-122.
- Boote, K. J., James W. Jones, and Nigel B. Pickering, 1996, Potential Uses and Limitations of Crop Models, *Agronomy Journal*, 88: 704-716
- Boyer, J. S., H. G. McPherson, 1975, Physiology of water deficits in cereal crops. *Advances in Agronomy* 27: 1-23
- Cruz, R. T. and J. C. O'Toole, 1984, Dryland Rice Response to an Irrigation Gradient at Flowering Stage, *Agronomy Journal*, 76: 178-183
- DeWit, C. T., 1958, Transpiration and crop yield of field crops and herbage. *Onderz Biol. and Chem. Research* 64: 6-12.
- Doorenbos, J. and A. H. Kassam, 1979, Yield response to water, *FAO irrigation and drainage paper 33*, Rome, Italy, pp.193
- Hanks, R. J., H. R. Gardner, and R. L. Florian, 1969,

- Plant Growth-Evapotranspiration Relations for Several Crops in the Central Great Plains, *Agronomy Journal*, 61: 30-34
- Hanks, R. J., 1974, Model for Predicting Plant Yield as Influenced by Water use, *Agronomy Journal*, 66: 660-665
- Hanks, R. J. and V. P. Rasmussen, 1982, Predicting Crop Production as Related to Plant Water Stress, *Advances in Agronomy*, 35: 193-215
- Haouari, M., and M. Azaiez, 2001, Optimal cropping patterns under water deficits, *European Journal of Operational Research*, 130: 133-146
- Hill, R. W., D. R. Johnson, and K. H. Ryan, 1979, A Model for Predicting Soybean Yields from Climatic Data, *Agronomy Journal*, 71: 251-256
- Hill, R. W., 1982, R. J. Hanks, and J. L. Wright, Crop yield models adapted to irrigation scheduling programs, final report, Utah agricultural experiment station, Utah State University, Logan, Utah
- Hood, C. P., R. W. McClendon, and J. E. Hook, 1987, Computer Analysis of Soybean Irrigation Management Strategies, *American Society of Agricultural Engineers*, 30(2): 417-423
- Hook, J. E., 1994, Using Crop Models to Plan Water Withdrawals for Irrigation in Drought Years, *Agricultural Systems*, 45: 271-289
- Jensen M.E., 1968, Water Consumption by Agricultural Plants. Chapter 1. In: T.T. Kozlowski (Ed) *Water Deficits and Plant Growth Vol. II* : 1-22, Academic Press, New York.
- Kanemasu, E.T.; and V.P. Rasmussen, 1978, Estimating water requirements for corn with a "pocket" calculator, *Bull Kans Agric Exp Stn*, 615
- Namuco, O. S. and J. C. O'Toole, 1986, Reproductive Stage Water Stress and Sterility. I. Effect of Stress During Meiosis, *Crop Science*, 26: 317-321
- Rahman M. S. and S. Yoshida, 1985, Effect of Water Stress on Grain Filling in Rice, *Soil Science and Plant Nutrition*, 31(4): 497-511
- Rasmussen, V. P. and R. J. Hanks, 1978, Spring Wheat Yield Model for Limited Moisture Conditions, *Agronomy Journal*, 70: 940-944
- Ritchie, J. T., 1998, Soil water balance and plant water stress, *Understanding options for agriculture production*, Kluwer academic publisher, 41-54
- Stewart, J. I.; R. M. Hagan; R. J. Hanks, W. T. Franklin ,and W. O. Pruitt, 1977, Optimizing Crop Production Through Control of Water and Salinity Levels in the Soil, Utah Water Research Laboratory, Logan, Publication PRWG151-1, pp.191.
- Wright, J. L.; M. E.Jensen, 1978, Development and evaluation of evapotranspiration models for irrigation scheduling, *Trans ASAE*, 21(1): 88-91.
- 林毓雯、陳綺玲、王鐘和、劉滄琴，2001，水稻生長模式之建立，行政院農業委員會 90 年度試驗研究計畫研究報告。
- 李健鋒、宋勳、陳世雄，1996，營養生長期提早斷水對水稻生育之影響，台中區農業改良場研究彙報，50: 1-9。
- 許宗民，1983，水稻耐旱與節水灌溉之研究，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文，pp. 94。
- 陳世雄，1992，土壤還原電位對水稻根活性與光合作用之影響，*中華農藝*，2: 168-191。
- 陳世雄、李建鋒，1999，第九章 土壤環境逆境與水稻生產，環境與稻作生產，環境與稻作生產，台灣省農業試驗所/中華農業氣象學會出版，楊純明主編，p.136-159。
- 張英勝，1995，從植物氣候學探討台灣水稻之產能，國立台灣大學農業化學研究所博士論文，pp. 207。
- 劉麗飛，1999，第六章 缺水及鹽分對水稻生產

之影響，環境與稻作生產，台灣省農業試驗所/中華農業氣象學會出版，楊純明主編，p.88-103。

蔡明華、陳益榮，2000，農業用水總量清查報告，中華民國行政院農業委員會網站 <http://www.coa.gov.tw/magazine/farming/8905/010.htm>

耕地面積與農業人口，2003，中華民國行政院經濟部水利署網站，
<http://www.wra.gov.tw/2001/wr/farm.asp>。

農田水利教材-肆水稻栽培，1998，財團法人台北市七星農田水利研究發展基金會、財團法人農業工程研究中心編印，pp.28。

賴明信、楊純明、郭益全，1998，土壤缺水對水稻與陸稻期作間生產之影響-(一)生長與產量之差異，中華農業研究，47(2): 95-107。

收稿日期：民國 95 年 2 月 20 日

修正日期：民國 95 年 3 月 1 日

接受日期：民國 95 年 3 月 4 日