

# 水稻田水資源及水分利用效率之探討

姚銘輝\*、漆匡時

行政院農業委員會農業試驗所農工組

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

## 摘要

摘要	168
一、前言	168
二、水資源利用概況	169
三、農業用水所面臨之挑戰	169
四、水稻之水分利用效率	170
五、水稻對乾旱之反應	172
六、耐旱性機制之探討	172
七、田間水資源評估之研究	174
八、結語	175
九、引用文獻	175
ABSTRACT	179

# 水稻田水資源及水分利用效率之探討

姚銘輝\*、漆匡時

行政院農業委員會農業試驗所農工組

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

## 摘要

我國年平均降雨量高達 2,500 公厘以上，和世界年平均降雨量相較，是屬於雨量豐沛的區域，然而，受限於地形和季節因素的影響，河流短促且降雨分布不平均，多數雨水逕流入海，在豐水期的逕流量高達 85 % 以上。因此，如何有效的調控水資源，以滿足各項用水需求是重要的課題。水稻是我國種植面積最廣，同時也是需水量最大的糧食作物，如何開發水分管理系統以減少灌溉用水量及增加水分利用效率是需要努力的工作。水稻水分利用效率數值在  $0.5-1.6 \text{ g kg}^{-1}$  間，若以進水量作為基值，水分利用效率大約為  $0.3-0.7 \text{ g kg}^{-1}$ ，均較小麥( $0.8-1.6 \text{ g kg}^{-1}$ )及玉米( $1.6-3.9 \text{ g kg}^{-1}$ )為低。偏低的原因為水田較其他作物有較高的滲漏及滲流，這種無助於水稻生產之耗水量，主要在於整田及生育期間維持湛水狀態所致。作物缺水時，光合作用下降主要是氣孔關閉所致，而  $\text{CO}_2$  同化的限制使電子傳送反應受阻，有過多還原力造成活化氧族的產生，導致光氧化及光抑制的傷害。作物有複雜的抗氧化系統以對抗活化氧族的傷害，在不同耐旱程度之品種或基因型，降低氧化傷害和增加抗氧化系統有密切關係。

**關鍵詞：**水稻、水資源、水分利用效率、耐旱性、螢光。

## 一、前言

傳統農業遭受最多批評之處，在於使用與產值不成比例的自然資源，包括土地及水資源。水稻田是我國農地所佔面積最大，同時也是水資源利用最多之作物。雖然過去對於水稻水分逆境研究甚多，但僅限於盆鉢或小面積試區所做的結果，對於實際水田用水情形缺乏全面性的瞭解，無法對需水量作精確估算，常造成灌溉管理的困擾，影響水源分配及造成政策制訂上的盲點。此外，我國在加入 WTO 後，

農業生產面臨轉型，加上工業及民生用水的增加，致使過去農業用水方式(例如漫灌)受到批判。而近年所研議之水權及水費徵收問題，都將使產值偏低的農業生產面臨更大的挑戰。本文首先針對我國農業水資源利用情形及未來將面臨的危機作介紹，另水稻田用水占農業用水的三分之二以上，因此水稻水分利用效率及栽培方式的改進對水資源調配非常重要。而在水資源短缺時，對水稻耐旱機制的瞭解有助於節水措施的研擬，故最後將介紹精確量測田間需水量的方法及有待解決的問題。

## 二、水資源利用概況

地球表面約 70% 為海洋，30% 為陸地，但地球上的水約 97% 為海水，剩下 3% 為淡水和南北兩極的冰水，其中容易被人類利用的水僅佔全部水量的 0.008%，約 10.5 萬立方公里 (km<sup>3</sup>)。如果以標的用水的分配而言，農業用水佔最大部份，約為 70%，工業用水為 20%，生活用水為 10%。台灣地區總用水量約 185 億立方公尺 / 年 (經濟部水資源局 2001)，農業用水佔 69%，工業用水佔 11%，生活或民生用水佔 20%。水資源的來源主要以降雨及地下水為源，我國屬海洋性亞熱帶氣候，年平均雨量高達 2,500 公厘以上，為世界年平均雨量 970 公厘的 2.7 倍。然而受限於地形和季節因素，河流短促且降雨分布不平均，多數雨水逕流入海，在豐水期的逕流量高達 85% 以上，使得雨水實際利用率偏低。為維持穩定供水，興建水庫可對枯豐水期的需水作適當調節，可惜我國的地質容易淤沙而不宜興建水庫。縱使勉強增建，在水庫壽命不長的情況下，不但經濟效益不高，對整體環境的衝擊也不容忽視。近年來水庫興建問題更因政治力的介入，使得壩址的選定更形複雜。

## 三、農業用水所面臨之挑戰

臺灣地區農業用水自 1991 年起，總可用水量逐年減少，其中以灌溉用水減少最多，主要原因是乾旱缺水。尤其是一期作插秧期無法提供充足水源最為常見，原因除集水不易及氣候不穩定外，灌溉水移作其他用途也是原因之一。以嘉南農田水利會為例，1992 年全年的實際用水不及計畫用水的 70%，被移用的農業用水在五千萬立方公尺以上。由此可知，農業用水本身已呈現不足，而在遭逢缺水的情形下，又常需將原本已不敷使用的灌溉用水移作

他用，更加劇農業的缺水現象，而不得不以休耕因應。2002 年嘉南農田水利會所轄地區，因缺水而導致休耕面積達二萬公頃。雖然目前農業政策鼓勵休耕及轉型，農地逐步釋出，灌溉面積減少，似乎農業灌溉用水應有剩餘。但事實上，由於缺乏整體規劃，休耕區域十分零星，灌溉區四處分散，不但破壞原先的灌溉系統，更增加田間營運之管理費用與用水量。另一方面，由於目前都市及工業區不斷擴展，水質受都市污水及工業廢水排放之污染，灌溉用水需要更多量水源稀釋污水，才能維持正常的農業生產。另就水資源的分配而言，根據我國水利法第二條規定，水為天然資源，屬國家所有，不因人民取得土地所有權而受影響。同時第十八條也規定，各用水標的的順序依次為家用及公共給水、農業用水、水力用水、工業用水、水運與其他用途。因此，農田灌溉用水屬國家所有而非私人，並且除提供民生用水外，在水資源分配上，以農業用水為優先。惟由於工業用水的經濟產值高出農業用水甚多，農業水權在水田面積減少，產值萎縮的趨勢下，不僅需提供其他用水標的使用外，更面臨未來必須逐步釋出水權的壓力。因此，就農業用水而言，絕非外界想像中的充裕。

灌溉用水直接由河川取用者佔 80%，水庫或埤池供水佔 10%，其餘 10% 分別為地面回歸水及地下水。農田灌溉用水量有其時間性與地區性的差異，灌溉用水使用的尖峰集中在整田及插秧時期，其餘時期僅在維持地面湛水，用水量較少。由於我國二期作與翌年一期作間之冬季屬於旱季，河道乾枯及水庫蓄水量不足情形下，若 2、3 月春雨不足時，則乾旱缺水壓力即顯現。二期作因颱風所帶來豐沛雨量，所面臨的農業氣象災害反而為水害。因為降雨分佈在時間上的差異，導致用水分配上的困難及供給水源系統的不同，以抽取地下水提供灌溉為例，第一期作抽取量約為第二期作

1.5~3.0 倍之間，因此面臨缺水壓力大多集中在一期作。

氣候變遷對水資源的影響評估有相當多研究報告，基本上認為，溫室效應使溫度升高而加速水文循環，改變降水的分佈，影響逕流的大小和時間，及淹水和乾旱的強度和頻度。依據 IPCC(2001)研究報告指出，全球大部分地區淡水水資源在氣候變遷的預估下都呈枯竭的情形。依據童(1997)以大甲溪為例的研究發現，未來二倍 CO<sub>2</sub>時，我國雨量增加 4%，但豐水期增加 7%，枯水期卻減少 3%。由此可知，未來降雨呈極端化，豐水期(夏季)雨量增多，逕流增大，對農作物造成降水傷害；枯水期(冬季)則降雨日數減少，溫度升高結果，加速蒸發散，使水資源更形緊縮。

#### 四、水稻之水分利用效率

比較作物需水量或耗水量的差異，常用水分利用效率(water-use efficiency; WUE)作為評估的標準。Viets(1962)以農藝觀點對 WUE 作以下的定義：

$$WUE = \frac{\text{作物產量(通常指經濟產量)}}{\text{生產此產量之用水量。}}$$

如果將使用水量的來源及用處再作區分，則為

$$WUE = \frac{\text{作物產量}}{(Pe + I + Sw)}$$

其中，Pe：有效降雨量；I：灌溉用水量；Sw：作物根圈之土壤水分缺少量。

就上式而言，忽略土壤滲漏、地下水利用及表面逕流(runoff)，因此，Howell (2001)將 WUE 更進一步定義為

$$WUE = \frac{(HI \times DW)}{\{T(1 - Wc)[1 + (E / (P + I + Sw - D - Q - E))]\}}$$

其中，HI：收穫指數(產量 / 乾物重)；DW：乾物重(全株各器官之乾重)gm<sup>-2</sup>；T：蒸散作用(mm)；Wc：標準水分含量(Standard water content)(玉米為 0.15-0.155，其他穀類為 0.14)；E：土壤蒸發量(mm)；D：根圈以下之滲漏量；Q：表面逕流量。

雖然上式所定義之用水量是生產該產量所需水量的總量，但是所受的影響因子極多，包括滲漏(percolation)和滲出(seepage)兩項非用於水稻生產的耗水量，兩項總和佔總用水量的 50-80% (Sharma 1989)。因此就水稻生長之需水量可定義為(Tanner and Sinclair 1983)

$$WUE = Y / ET$$

其中，ET：包括土壤表面蒸發及葉片經由氣孔之蒸散量。ET 可由水田能量平衡式得到，單位可用 Wm<sup>-2</sup>和 KJ m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>表示。

$$ET = R_n - G - H - P$$

其中，R<sub>n</sub>：淨輻射量；G：土壤熱通量；H：可感熱(sensible heat)及 P：光合成通量。

表 1 為整理相關文獻所得水稻、小麥及玉米之水分利用效率的數值。水稻數值(WUE<sub>ET</sub>)範圍極廣，由 0.5-1.6 g kg<sup>-1</sup>間，若以進水量作為基值，則水分利用效率大約為 0.3-0.7 g kg<sup>-1</sup>，均較小麥(0.8-1.6 g kg<sup>-1</sup>)及玉米(1.6-3.9 g kg<sup>-1</sup>)為低。較低的原因為水田較其他作物有較高的滲漏及滲流，而如果將整田所用的水也加入計算，則水稻數值將更低至 0.25-0.6 g kg<sup>-1</sup>。Revelle(1963)指出 4000 公升的水才生產 1 公斤的稻米，相反的，小麥僅需要 1000 公升，這主要是栽培差異所致。在傳

統移植方式種植水稻，農民一般會以較高之灌水深度種植，以控制田間雜草及減少灌溉頻率，這會造成滲漏量的增加，同時，長時間表土灌水增加蒸發量，也是水稻生產相同穀物重量需較多水量的原因。此外，水分利用效率數值變化大之原因，和作物栽培及管理技術有密

切關係。在亞洲熱帶地區的灌溉水稻產量為  $4-6 \text{ t ha}^{-1}$ ，但管理良好可達  $10 \text{ t ha}^{-1}$  (Peng *et al.*, 2000)。因此，水分利用效率之差異除水分提供量外，能影響產量之作物管理方式，如土壤營養、行株距和種植時間(Turner 1997)皆是影響因素。

表 1. 水稻、小麥及玉米之水分利用效率比較，以穀粒產量 / 蒸發散量( $WUE_{ET}$ )及穀粒產量 / 田間進水量( $WUE_{IF}$ )兩種方式表示。

$WUE_{ET}$	$WUE_{IF}$	Source of data	Location
Rice			
1.1	0.45	Sandhu <i>et al.</i> ,(1980)	India
0.95	0.66	Kitamura(1990), dry season	Malaysia
0.88	0.48	Kitamura(1990), Wet season	Malaysia
0.89	0.34	Mishra <i>et al.</i> ,(1990)	India
		continuous flooding	
0.89	0.37	Mishra <i>et al.</i> ,(1990)	India
		alternate wetting and drying	
1.61	0.68	Bhuiyan <i>et al.</i> ,(1995)	Philippines
		wet-seeded rice	
1.39	0.48	Bhuiyan <i>et al.</i> ,(1995)	Philippines
		transplanted rice	
0.4-0.5		Khepar <i>et al.</i> ,(1997)	India
Wheat			
0.65	0.8	Sharma <i>et al.</i> ,(1990)	India
0.87	0.79	Pinter <i>et al.</i> ,(1990)	
1.0-1.5	1.0-1.6	Deju and Lu Jingwen(1993)	China
1.0-2.0		Turner(1997)	Australia
Corn			
2.8	2.2-3.9	Stegman(1982)	USA
1.7-2.1	1.6-1.7	Stockle <i>et al.</i> ,(1990)	USA
1.9-2.8	1.9-2.5	Moridis and Alagcan(1992)	Philippines

許多探討水稻灌溉深度和持續時間的研究結果證明，連續淹灌並非是獲得高產的基本條件。Singh *et al.*,(1996)指出水稻田僅用非常薄的水層，田間飽合水或乾濕交替均可減少田間用水量 40-70 % (和傳統連續灌水灌溉相比)，且不影響產量。在改進水稻水分利用效率可由四個方向加以思考 (Wallace and Batchelor 1997)。(i)經由作物育種或栽培管理

增加收穫指數。(ii)經由品種選育及作物育種減少蒸散比例。(iii)提高乾物重產量，經由施肥、病蟲害防治和適當行株距等管理措施。(iv)由水分平衡中減少蒸散組成份，例如利用殘留物覆蓋以減少土壤水分蒸發及表面逕流。就上述四項增加水分利用效率的策略中，(i)及(ii)較難立即改善，事實上，品種選育除水分利用效率外，尚有其他的考量(如品質)，是屬於長

期性的目標。(iii)則有較多的研究，主要利用精準化農耕，詳細評估所需投入項(如肥料、農藥及水分等)的時機及在田間分布情形，以達到最大效率。(iv)包括目前使用之節水技術，以增加降雨量截取，並改善灌溉技術以避免操作上之損失。

## 五、水稻對乾旱之反應

水稻遭受缺水逆境時之徵狀及生理反應，Bouman and Tuong (2001)綜合多篇報告分別描述如下：

水稻在乾旱環境時，抑制新生葉片及葉面積減少，導致葉片生長延遲和減少對光線的截取，使群落光合作用下降，同時也影響細胞分化及增大，尤其細胞增大對乾旱敏感度高。

氣孔關閉導致葉片蒸散速率和光合作用速率的降低。當土壤水分含量低於飽合水以下，葉片蒸散作用即開始下降，但葉片氣孔的關閉並非立即關閉，因此光合作用在氣孔關閉前仍可維持一段時間，但此時之同化物質並非用於葉片生長或伸展，而是儲存於現存之葉、莖或根中，當乾旱逆境減緩，同化物再轉為供葉片生長之用。

1. 水稻葉片捲曲減少對光線截取之有效葉面積，但也減少水分的散失，而當乾旱逆境減緩則恢復原來面積，是針對逆境的一種適應方式。

2. 改變同化物分配情形。根部在乾旱時生長較為快速，尤其是深根可截取土壤深層之水分。

3. 加速葉片老化及分蘖數減少。分蘖期遭遇乾旱將減少分蘖數和每叢穗數，但如果乾旱及時結束，此時同化物供源大小仍足夠大，所短缺之分蘖數和穗數，可由每穗粒數及千粒重的增加而獲得補償。

水稻在營養期缺水雖不致於使產量大幅

減少，但會延遲開花及延長生育時間，但如果在生殖期缺水則會導致水稻減產(Wopereis *et al.*, 1996)。水稻整個生育過程中，對乾旱最敏感在於幼穗發育到開花這段時間(Cruz and O'Toole 1984)。始穗期缺水影響穎花基原體(spikelet primordia)數目，而在減數分裂或開花期，小花不稔數增加，減少穀粒充實比率。事實上，水稻在生殖期一系列的發育過程中，通常較少彈性和補償能力(O'Toole and Chang 1979)，因此在始穗期缺水對後續產量有極大影響。而穀粒充實期對於乾旱較不敏感，因為此時由營養器官傳送同化物質至穀粒較不受乾旱影響(Kobata and Takami 1983)，甚至在遭受中度缺水反而增加穀粒充實速率，使充實粒數及產量增加 (Yang *et al.*, 2001)。乾旱環境之穀粒品質，受小穗內穀粒不同充實速率和同化物的競爭影響，這主要受品種特性之基因型的影響最大 (Cheng *et al.*, 2003)。

## 六、耐旱性機制之探討

作物遭受乾旱逆境時，葉片氣孔關閉，影響 CO<sub>2</sub> 的吸收，但有些作物耐旱性甚強，當葉片相對水分含量(relative water content ; RWC)低於 70 % 時，最大光量子產量和光合作用能力(capacity of photosynthesis)才有明顯下降(Kaiser 1987)。作物在乾旱環境時，葉綠體內部的 CO<sub>2</sub> 濃度偏低，這可由螢光反應(Cornic and Briantais, 1991)或同位素 <sup>18</sup>O<sub>2</sub> 吸收情形 (Tourneax and Peltier 1995)得到證明。但在無或低淨 CO<sub>2</sub> 同化作用進行時，電子傳遞速率(electron transfer rate)仍維持在 75 % (Asada, 1999)，顯示葉片內 Rubisco 的氧化作用增加，也就是 Rubisco 對 O<sub>2</sub> 反應比例增加(進行光呼吸作用)以消耗電子。事實上，增加光呼吸及 Mehler 反應速率是防禦乾旱的一種機制，以保護 PSII 在乾旱和高光環境下之穩定度(Park

et al., 1996)。當乾旱使氣孔關閉及 CO<sub>2</sub> 呼吸量減少，在正常光照下即可能發生光傷害，這是光能利用和 PS II 使用不平衡所致 (Powles 1984)。雖然光傷害會在各種光強下發生，但植體本身的修補機制也維持進行，所以光抑制不見得會出現，主要決定於光傷害程度及修補機制間的平衡 (Baroli and Melis 1998)。有些研究指出 PS II 光化學反應在中度缺水時不受影響，如果是嚴重缺水則影響兩種光系統 (PS I 及 PS II)，同時光化學胞器和葉片光合作用色素的完整性也受限制 (Colom and Vazzana, 2003)。

作物對於乾旱逆境有防禦系統，包括葉片捲曲及氣孔關閉以減少水分散失，加速根部生長以獲得更多土壤水分，或者是葉片細胞內的滲透調節 (朱，2002)，以避免其他逆境的產生。至於品種間不同耐旱程度，往往取決於品種之代謝速度及不同防旱機制間速率的協調。本文針對乾旱時光氧化現象及其防禦機制

作介紹。作物缺水時，光合作用下降主要是氣孔關閉所致，而 CO<sub>2</sub> 同化的限制使電子傳送反應受阻，有過多還原力造成活化氧族 (active oxygen species; AOS) 的產生，導致光氧化及光抑制的傷害 (圖 1)。AOS 主要代謝區域及作用在膜傷害和脂質過氧化。植物有複雜的抗氧化系統以對抗 AOS (Smirnoff, 1995)。包括三種方式，(i) 可溶性脂質：膜相關抗氧化物 (e.g.  $\alpha$ -tocopherol,  $\beta$ -carotene)；(ii) 小型水溶性抗氧化分子 (e.g. ascorbate, glutathione)；(iii) 酵素性抗氧化物，包括 superoxide dismutases (SOD)。SOD 可將過氧化物轉化為毒性較低之 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，再由 catalase, guaiacol type peroxidase 及 ascorbate-glutathione cycle (e.g. ascorbate peroxidase) 去除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 之毒性。對乾旱具有抗性之品種或基因型可增加抗氧化系統的表現，並降低氧化傷害 (Smirnoff, 1995)，其中 SOD 酵素活性

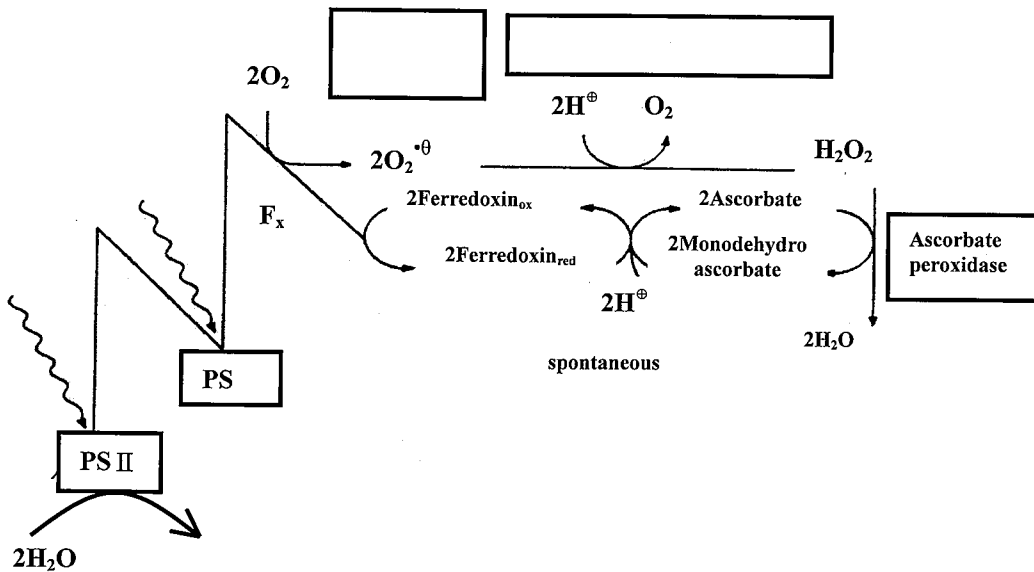


圖 1. 作物乾旱逆境之光氧化反應。

對缺水特別敏感，尤其是抗旱品種，所以較高 SOD 活性是評估氧化逆境保護的量化基礎 (Asada, 1999)。另外利用轉殖植物 overexpressing SOD 可增加對抗氧化逆境之耐性 (Foyer *et al.*, 1994)。但有些 SOD 活性在抗旱反應並不相同，無法有一致反應的原因可能是品種或基因型、生長狀態、逆境時間、株齡和逆境強度 (Martinez *et al.*, 2001)。此外，SOD 避免光氧化傷害需要迅速去除  $H_2O_2$ ，以避免產生毒性更強之氫氧根自由基，但這過程需要其他代謝系統 (包括 catalase 和 ascorbate peroxidase 酵素活性) 相配合，僅增加 SOD 活性並無法提供抗氧化逆境的保護 (Pritcher *et al.*, 1991)。

## 七、田間水資源評估之研究

我國水稻種植由移植或直播後會維持湛水 5-10 公分的水深，至整個生育期結束。雖然整田時需水量理論約為 150-200 mm，但如果持續時間過長，則可能高達 350-1500 mm (Ghani *et al.*, 1989)。Cabangon and Tuong (1999) 認為整田前的土壤若為乾燥或龜裂之黏土，滲漏量為  $25 \text{ mm d}^{-1}$ ，但如果在淹滿水且耕犁後，犁底層形成，且上層土壤呈黏糊狀，則相同土壤之滲漏量降為  $5 \text{ mm d}^{-1}$ ，這說明整田時間越久則需水量越大。水稻生育期間的需水量由 500 至 800 mm 間，最高超過 3000 mm (Hukkeri and Shama, 1980)，這包括土壤蒸發、葉片蒸散、滲漏和滲流。水田之蒸發及蒸散一般並不加以區分，以蒸發散 (evapotranspiration; ET) 統稱。水稻在移植 3 周內，土壤蒸發量大約佔 ET 值的 85%，之後因葉面積增大的遮蔭效應，蒸發值下降，移植後 40 天下降至 ET 值之 20%。而當整個植被形成 (葉面積指數約 3.0)，蒸發值僅佔 10%，整個水稻生育期之蒸發值約佔 30%。ET 值也

受氣象條件影響，在溫帶及亞熱帶 (如中國)，由生育初期 (5 月) 的  $2-3 \text{ mm d}^{-1}$ ，到 7 月至 10 月間之  $7-8 \text{ mm d}^{-1}$ ，生育期平均約為  $4-5 \text{ mm d}^{-1}$  (Zhi, 1992)；熱帶地區 ET 值約為  $4-12 \text{ mm d}^{-1}$  之間，生育期平均為  $6-7 \text{ mm d}^{-1}$ 。生育期所用水量之 50-80% 是以滲漏和滲流所消耗 (Sharma, 1990)。滲漏指水由垂直方向往土壤底層流入 (圖 2)，屬於整個區域；滲流是橫向由田埂滲出，屬於田區周圍部份。滲漏受土壤質地和其他因素影響，土壤鬆軟時，滲漏量提高，水田黏土約為  $1-5 \text{ mm d}^{-1}$ ，砂壤土可高達  $24-29 \text{ mm d}^{-1}$  (Khan, 1992)。

我國水稻生產過程中，究竟一塊田區在水稻生育期間需要多少水？這個問題到目前為止仍沒有答案，過去研究都以模式估算，例如利用作物微氣象變化或氣候資料相關關係式來估算作物需水量，但大多以旱作物為主。陳及甘 (1997) 利用氣候資料針對我國十個主要地區進行水稻需水量的估算工作，但所用 Penman-Monteith 估算法仍是以旱田作物所發展出來的模式，加上並沒有田間實測值，因此無法驗證。在探討水田需水量前應先瞭解消耗量，水稻田和旱田最大區別處在於田間湛水狀態，在水稻生育初期，水面湛水的蒸發現象佔整體蒸發散量大部份，但隨著植株生長，葉面積增大，整個群落 (Canopy) 覆蓋地表，此時水分的消耗以葉片蒸散作用為主。由於蒸發和蒸散在估算上並不相同，因此，水稻生育過程中葉片蒸散及地表蒸發應加以區分，並且量化所消耗的水汽量，這樣對水稻田需水量才能有精確的估算。

蒸發散量測方法很多 (申, 2002)，包括土壤水分平衡法、設置稱重型滲透計 (lysimeter)、測定植物含水勢能，或是由氣象因子代入模式估算等，上述方法都有其在使用上的限制，不是無法直接觀測就是不可任意移動。目前本所所建立之渦流相關系統 (eddy



correlation system) 可以適當地克服上述限制，能精確量測瞬時蒸發散量。渦流相關系統主要是量測垂直風速及絕對濕度，並因統計學上擾動值即為標準偏差，因此蒸發散量即等於垂直風速與絕對濕度的互變異數(covariance)。由於該系統建立在簡單基本的理論基礎上，不需要配合其他地表自然因子(如地表粗糙度)和大氣因子(如大氣穩定度)，是作為蒸發散量實測值及模式驗證的基本資料。

## 八、結語

第 3 屆世界水論壇會議(The 3rd World Water Forum)於今年(2003 年)3 月在日本舉行，會中曾討論所謂虛擬水(virtual water)的觀念，這是由英國倫敦大學 J. Anthony Allen 教授在 1998 年提出的觀念，他認為中東地區的糾紛主要來自於對水資源的爭奪，由於農業用水佔可用水資源的大部份，若能以進口農產品取代農業生產以節省農業用水，將所餘的水資源用於工業或民生方面，則可消弭戰爭發生的可能。以經濟觀點而言，生產一噸小麥需耗用一千噸水；一噸稻米更需要四千噸的水資源，透過貿易行為以調控水資源似乎是值得思考的方向。但水資源的定位並非僅限於經濟領域，從國防、農業、生態及生活等，皆可由不同領域定義農田在水資源的重要性。我國降水所帶來的水資源雖然豐沛，但由於過度集中反而造成水災，逕流量過大集水不易，且對土壤表層嚴重沖刷造成土石流，影響居民生命及財產安全。冬季又屬旱季，一期作整田耕犁時常有缺水問題，所以就我國現況而言，水資源是"不患寡而患不均"，如何有效及精準調控水資源的利用是非常重要的課題。近年來所提倡之水稻田深水灌溉即著眼於調控夏季豪雨的水資源，而節水措施為一期作初期缺水的對策，但不論是深水或節水栽培實行的前提是需要

對水稻田的耗水分配及需水量有確切數據，包括水稻田蒸發、葉片蒸散、田間滲漏及滲流等，皆需要有實測數據及模式化之水分利用系統。目前農業試驗所農工組已從事水田水資源量測及對水稻生育影響的工作，利用水田能量平衡直接量測水稻生育期間之潛熱變化，可得到每日之蒸發散量，並配合水錶及水位計的量測，確切掌握田區內水量消耗情形，並擬開發水分利用評估模式，由氣象資料、土壤特性、水稻生育階段建立需水量模式，以供各項水資源管理策略的依據。

## 九、引用文獻

- 申雍。2002。田間蒸發散量之估測與應用。p. 85-96。農業氣象及農業水資源之應用與管理研討會專輯。楊純明、林富雄、林俊義，主編。中華農業氣象學會/行政院農業委員會農業試驗所出版，臺中縣。
- 朱德民。2002。作物耐旱原動力—滲透調節物。p.97-104。農業氣象及農業水資源之應用與管理研討會專輯。楊純明、林富雄、林俊義，主編。中華農業氣象學會/行政院農業委員會農業試驗所出版，臺中縣。
- 陳清田、甘俊二。1997。台灣地域性作物需水量之推估研究。農業工程學報 43: 1-18。
- 童慶斌。1997。氣候變遷對大甲溪上游河川流量之衝擊。台灣水利季刊 45: 64-70。
- 經濟部水資源局。2001。臺灣地區民國八十八年各標的用水量統計報告，臺北市。
- Asada, K. 1999. The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of active oxygen and dissipation of excess photons. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 601-639.
- Baroli, I. and A. Melis. 1998. Photoinhibitory

- damage is modulated by rate of photosynthesis and by photo-system II light—harvesting chlorophyll antenna size. *Planta* 205 : 288-296.
- Bhuiyan, S.I., M.A. Sattar and M.A.K. Khan. 1995. Improving water use efficiency in rice irrigation through wet seeding. *Irrig. Sci.* 16 : 1-8.
- Bouman, B.A.M. and T.P. Tuong. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agric. Water Manag.* 49:11-30.
- Cabangon, R.J. and T.P. Tuong. 2000. Management of cracked soils for water saving during land preparation for rice cultivation. *Soil and Tillage Res.* 56:105-116.
- Cheng, W., G. Zhang, G. Zhao, H. Yao and H. Xu. 2003. Variation in rice quality of different cultivars and grain positions as affected by water management. *Field Crops Res.* 80 : 245-252.
- Colom, M.R. and C. Vazzana. 2003. Photosynthesis and PS II functionally of drought – resistant and drought-sensitive weeping lovegrass plants. *Environ. Exp. Bot.* 49 : 135-144.
- Cornic, G. and J.M. Briantais. 1991. Partitioning of photosynthetic electron flow between CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> in a C<sub>3</sub> leaf (*Phaseolus vulgaris* L.) at different CO<sub>2</sub> concentrations and during drought stress. *Planta* 183 : 178-184.
- Cruz, R.T. and J.C. O'Toole, 1984. Dry land rice response to an irrigation gradient at flowering stage. *Agron. J.* 76 : 178-183.
- Deju, Z. and L. Jingwen. 1993. The water use efficiency of winter wheat and maize on a salt-affected soil in the Huang Huai river plain of China. *Agri. Water Manag.* 23 : 67-82.
- Foyer, C.H., M. Lelandais and K.J. Kunert. 1994. Photooxidative stress in plants. *Physiol. Plant* 92 : 698-717.
- Fukai, S., L. Li., P.T. Vizmonte and K.S. Fischer. 1991. Control of grain yield by sink capacity and assimilate supply in various rice (*Oryza sativa*) cultivars. *Exp. Agric.* 27 : 127-135.
- Ghani, M., S.I. Bhuiyan and R.W. Hill. 1989. Gravity irrigation management in Bangladesh. *J. of Irrigation and Drainage Engineering* 115 : 642-655.
- Howell, T.A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93 : 281-289.
- Hukkeri, S.B. and A.K. Sharma. 1980. Water use efficiency of transplanted and direct-sown rice under different water management practices. *Indian J. Agric. Sci.* 50 : 240-243.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001*. p.191-233. Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kaiser, W.M. 1987. Effects of water deficit on photosynthetic capacity. *Physiol. Plant* 71 : 142-149.
- Khan, L.R. 1992. Water management issues for paddy fields in the low-lying areas of Bangladesh. In *Soil and Water Engineering for Paddy Field Management*. p.339-345. In: *Proceedings of the International*

- Workshop on Soil and Water Engineering for Paddy Field Management. eds V. V. N. Murty and K. Koga, Bangkok, Thailand.
- Khepar, S.D., S.K. Sondi, S. Kumar and K. Singh. 1997. Modelling effects of cultural practices on water use in paddy fields—a case study. Research Bulletin, Publication No. NP/SWE-1. : Punjab Agricultural University, Ludhiana, India.
- Kitamura, Y. 1990. Management of an irrigation system for double cropping culture in the tropical monsoon area. Technical Bulletin 27. Tropical Agriculture Research Center, Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries, Tsukuba, Japan.
- Kobata, T. and S. Takami. 1983. Grain production and dry matter partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) in response to water deficits during the whole grain-filling period. Jpn. J. Crop Sci. 53 : 283-290.
- Lafitte, R. 2002 . Relationship between leaf relative water content during reproductive stage water deficit and grain formation in rice. Field Crops Res. 76 : 165-174.
- Mao Zhi. 1992. Calculation of evapotranspiration of rice in China. In Soil and Water Engineering for Paddy Field Management. p.21-31. In: Proceedings of the International Workshop on Soil and Water Engineering for Paddy Field Management. eds. V. V. N. Murty and K. Koga, Bangkok, Thailand.
- Martinez, C.A., M.E. Loureiro, M.A. Oliva and M. Maestri. 2001. Differential responses of superoxide dismutase in freezing resistant *Solanum curtilobum* and freezing sensitive *Solanum tuberosum* subjected to oxidative and water stress. Plant Sci. 160 : 505-515.
- Mishra, H.S., T.R. Rathore and R.C. Pant. 1990. Effect of intermittent irrigation on groundwater table contribution, irrigation requirement and yield of rice in Mollisols of the Tarai region. Agric. Water Manag. 18 : 231-241.
- O'Toole, J.C. and T.T. Chang. 1979. Drought resistance in cereals-rice : A case study. In Physiology of Crop Plants. ed. H. Mussell and R.C. Staples. Wiley, New York, pp. 374-405.
- Park, Y.I., W.S. Chow, C.B. Osmond and J.M. Anderson. 1996. Electron transport to oxygen mitigates against the photoinactivation of photosystem II *in vivo*. Photosynth. Res. 50 : 23-32.
- Peng, S., R.C. Laza, R.M. Visperas, A.L. Sanico, K.G. Cassman and G.S. Khush. 2000. Grain yield of rice cultivars and lines developed in the Philippines since 1966. Crop Sci. 40 : 307-314.
- Powles, S. 1984. Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. Annu. Rev. Plant Physiol. 35 : 15-44.
- Pritcher, L.H., E. Brennan, A. Hurley, P. Dunsmuir, J.M. Tepperman and B.A. Zilinskas. 1991. Overproduction of petunia copper / zinc superoxide dismutase does not confer ozone tolerance in transgenic tobacco. Plant Physiol. 97 : 452-455.
- Revelle, R. 1963. Water. Scientific American 209 : 92-109.
- Sandhu, B.S., K.L. Khera, S.S. Prihar and B. Singh. 1980. Irrigation need and yield of rice on a sandy—loam soil as effected by continuous and intermittent submergence.

- Indian J. of Agri. Sci. 50 : 492-496.
- Sharma, D.K., A. Kumar and K.N. Singh. 1990. Effect of irrigation scheduling on growth, yield and evapotranspiration of wheat in sodic soils. *Agric. Water Manag.* 18 : 267-276.
- Sharma, P.K. 1989. Effect of periodic moisture stress on water use efficiency in wetland rice. *Oryza* 26 : 252-257.
- Smirnoff, N. 1995. Antioxidant systems and plant response to the environment. p.217-243. *In* : Smirnoff, N.(Ed.), *Environment and Plant Metabolism-Flexibility and Acclimation*. BIOS Scientific Publishers, Oxford.
- Stegman, E.C. 1982. Corn grain yield as influenced by timing of evapotranspiration deficits. *Irri. Sci.* 3 : 75-87.
- Stockle, C.O., L.G. James, D.L. Bassett and K.E. Saxton. 1990. Effect of evapotranspiration under prediction on irrigation scheduling and yield of corn : a simulation study. *Agric. Water Manag.* 19 : 167-179.
- Tanner, C.B. and T.R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production : research or re-research. p.1-27. *In*: *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair, eds. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Tourneux, C. and G. Peltier. 1995. Effect of water deficit on photosynthetic oxygen exchange measured using  $^{18}\text{O}_2$  and mass spectrometry in *Solanum tuberosum L.* leaf discs. *Planta* 195 : 570-577
- Turner, N.C. 1997. Further progress in crop water relations. *Adv. Agron.* 58 : 293-338.
- Viets, F.G. 1962. Fertilizer and efficient use of water. *Adv. Agron.* 14 : 223-264.
- Wallace, J.S. and C.H. Batchelor. 1997. Managing water resources for crop production. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B* 352 : 937-947.
- Wopereis, M.C.S., M.J. Kropff, A.R. Maligaya and T.P. Tuong. 1996. Drought-stress responses of two lowland rice cultivars to soil water status. *Field Crops Res.* 46 : 21-39.
- Yang, J., J. Zhang, Z. Wang, Q. Zhu and W. Wang. 2001. Remobilization of carbon reserve in response to water deficit during grain filling of rice. *Field Crops Res.* 71:47-55.

# Study of Water Resource and Water Use Efficiency in Paddy Field

Ming Hwi Yao\* and Kung Shy Chi

Division of Agricultural Engineering, Agricultural Research Institute, COA, Taichung Hsien, Taiwan, ROC

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

## ABSTRACT

The average rainfall in Taiwan is about 2,500 mm. When compared with the whole world rainfall standard, Taiwan is belonged to abundant rainfall area. However, the rainfall distribution in Taiwan is disproportionate and the landform is high and precipitous. It will be nearly 85 percent of runoff flowing into the sea directly. For this reason, how to use water resource effectively in order to satisfy water requirement on each purpose is an important issue. Rice (*Oryza sativa L.*) is the most widely grown and produced crop in Taiwan, but it is also the greatest consumer of water among all crops. In the present time, efforts must be made to develop new water management systems aimed at reducing irrigated water input and increasing water use efficiency in rice production in Taiwan. When comparing the water use efficiency (WUE) among rice and other crops in field during the growth period, data show that the WUE of rice is about 0.3-0.7 g kg<sup>-1</sup>, while it is 0.8-1.6 g kg<sup>-1</sup> for wheat and 1.6-3.9 g kg<sup>-1</sup> for corn. There are higher seepage and percolation in paddy field during rice growth. Those non-beneficial depletions and outflows are due to maintaining the flooded water layer on the soil surface during crop growth and land preparing stage in traditional rice cultivation. When rice grown under drought conditions during soil water deficit, the photosynthesis decreases due mainly to stomatal closure. The limitation of CO<sub>2</sub> assimilation will cause the inactivation of electron transfer reaction, an excess of reducing power is frequently generated in water-stressed plants. The over-reduction of photosynthetic electron chain may result in the formation of active oxygen species (AOS) that can lead to photoinhibitory and photooxidative damages. Plants are endowed with a complex antioxidant system to cope with AOS. Among different drought-tolerant varieties or genotypes, to increase the expression of antioxidant system is associated to decrease oxidative damages.

**Key words :** Rice, Water resource, Water use efficiency, Drought tolerance, Fluorescence.