

# 水稻之氣象資源利用效率探討-I. 輻射利用效率<sup>1</sup>

姚銘輝<sup>2,3</sup> 陳守泓<sup>2</sup> 梁連勝<sup>2</sup>

## 摘 要

姚銘輝、陳守泓、梁連勝。2005。水稻之氣象資源利用效率探討-I.輻射利用效率。台灣農業研究 54:123-134。

輻射利用效率適用於作物生長分析及模式建立之應用。本研究在農委會農業試驗所農場進行，評估水稻之輻射利用效率，以作為描述生長或分化之函數。試驗方法上利用鮑溫比/能量平衡之偵測系統，每二十分鐘量測葉片同化速率一次，以及光度計量測太陽輻射量及光合作用活化輻射量。研究結果顯示，二氧化碳通量和葉片所截取輻射通量具有高相關性，而一期作水稻之輻射利用效率變化由 1.11 至 2.32  $\text{gMJ}^{-1}\text{day}^{-1}$ ，二期作則由 0.95 至 1.50  $\text{gMJ}^{-1}\text{day}^{-1}$ 。本研究結果與其他文獻相較，輻射利用效率的數值有偏高情形，可能原因應與輻射量中散射光的比值有關，但仍需更進一步的探討。此外，輻射利用效率會隨葉面積指數及生育階段而改變。

**關鍵詞：**水稻、輻射利用效率、通量。

## 前 言

農作物每年產量的變異受氣候的影響達 80%以上(Hoogenboom 2000)，在建立作物模式以預測生長特性及產量，或進行氣象災害及氣候變遷衝擊評估方面，對於不同氣象變數在作物生長和發育的潛在影響需有詳盡的瞭解，尤其需以田間實際測值才能建立完整之模式。

早期研究資料即指出，作物所截取光能和其生長有密切線性關係，如 Shibles & Weber(1965)指出大豆在整個生育過程中，乾物重累積和截取輻射量有線性關係。Williams *et al.* (1965)認為玉米截取每百萬焦耳太陽輻射能可產生 1.71g 生質量，至 1977 年 Monteith 建立生質量累積和截取輻射量間之實測及理論基礎，並將兩者的比值稱為輻射利用效率(radiation-use efficiency；RUE)，其結論認為，在良好的生長環境大多數作物可得到 1.4  $\text{g MJ}^{-1}$ (即固定值)，同時由葉片最高光合作用速率得出輻射利用效率之理論曲線，而當最高光合作用速率偏低時，RUE 值特別敏感，之後有些研究估算輻射截取量，也同時估算 RUE。例如，Gallagher & Biscoe(1978)比較不同地區穀類作物的生長，在良好生長環境，大麥及小麥之 RUE 基本上是穩定且相近，RUE 值為 3  $\text{g MJ}^{-1}$ (PAR)或 1.35  $\text{MJ}^{-1}$  SR；在肥料供應不足和乾旱逆境下，RUE 會降低。而比較不同作物別，Gosse *et al.*(1986)指出 C<sub>4</sub>型作物 RUE 值最高，其次是穀類作物，最低為豆科作物。

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2231 號。接受日期：94 年 9 月 23 日。

2. 本所農業工程組副研究員、聘用人員與研究員。臺灣 臺中縣 霧峰鄉。

3. 通訊作者，電子郵件：mhyao@wufeng.tari.gov.tw；傳真機：(04)23331673。

輻射利用效率在農作物的研究甚多，如單葉(Salisbury & Ross 1992)、小試區(Kiniry 1994)和生長箱控制(Wall & Kanemasu 1990)，這些研究用於比較不同處理結果，但受限於無法以田間為尺度(Rochette *et al.* 1995)。Baldocchi(1994)認為以田間尺度量測更貼近實際狀態，因為如果評估生質量累積用破壞性取樣方式並不可行，這在空間易造成差異，而利用通量(flux)的量測可針對生質量累積和其他控制因素(如輻射量、溫度...等)作動態之即時偵測。Bugbee & Monje(1992)認為生質量累積可經由群落上方二氧化碳通量而作持續性偵測。另外，長期氣象研究發現二氧化碳通量和光合作用及生質量累積具有正相關性(Ham & Knapp 1998)。目前偵測二氧化碳通量以鮑溫比能量平衡(Bowen ratio / energy balance; BREB)方法最能直接偵測田間實際情形，雖然仍會有些錯誤的產生(Sinclair *et al.* 1975)，然而，許多研究皆可成功的量測 CO<sub>2</sub> 通量(Frank 2002; Emmerich 2003)。

雖然研究初期認為 RUE 值為定值，但事實上，該值受品種效應和不同肥料環境影響(Cheng *et al.* 2000)，同時許多試驗在人工控制環境和田間測量結果不同(Albrizio & Steduto 2003)，對於不同生育期的試驗也集中在營養生長期，不包括生殖生長期(Tjoelker *et al.* 1999; Cheng *et al.* 2000)。本研究利用本所農場之水稻試區作整個生育期的量測，在慣行栽培方式下，量測二氧化碳通量及太陽輻射量之日變化，探討氣象資源在農作物生長過程的利用效率，以作為作物模式及能量平衡建立之依據，以期在例行水稻生育調查計畫中，能有更精確測值及新的研究領域。

## 材料與方法

試驗地點為農委會農業試驗所農場，供試田區為 0.5 公頃，試區周圍皆為水稻田，提供平整及均勻之量測環境，水稻種植品種為台農 67 號，田間栽培管理及施肥依慣行方式進行。

輻射利用效率可由不同量測資料作計算，本研究中以三種方式探討水稻一、二期作之輻射利用效率變化，量測方法及計算公式分別如下述：

### 1. RUE<sub>FLUX</sub>：以通量方式計算輻射利用效率

CO<sub>2</sub> 通量是利用鮑溫比能量平衡(Bowen ratio / energy balance; BREB)系統(Model 023 / CO<sub>2</sub> Bowen ratio system, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)，在水稻插秧後四周開始測量，每 20 分鐘記錄一筆資料。儀器置放於平整水稻田區之中央位置，在所有方向皆有 100 m 以上之 fetch，通量計算係依據 Dugas *et al.*(1999)所述之方法。鮑溫比是由群落上方 0.5 和 1 m 處，每 2 秒作一次溫度和濕度的梯度差計算；可感熱(sensible heat flux)及潛熱(latent heat)則直接由鮑溫比計算而得；淨輻射量則由淨輻射計(Model Q7.1, REBS, Seattle, WA, USA)量測，另由二塊土壤熱流板(Model HFT, REBS)計算之土壤熱流通量(soil heat flux)；土壤溫度則由熱電偶線置於熱流板上量測。渦流擴散是將熱、水汽和二氧化碳等通量視為相同，CO<sub>2</sub> 通量由二種高度之水汽密度差(vapor density differences)作校正(Webb *et al.* 1980)，而不用溫度梯度是因溫度差異在空氣進入紅外線氣體分析儀(infrared gas analyzer, IRGA)分析時不顯著(Angell *et al.* 2001)。二氧化碳和水汽濃度是由近紅外光分析儀(Model 6262, Licor, Inc., Lincoln, NE, USA)量測，土壤水分含量是利用 time-domain reflectometry 方法將感測器(Model CS615, Campbell Scientific, Inc.)置於地下 5 cm，風速和風向由二維風速計(Model 03001 R.M. Young Company, MI, USA)，相對濕度和氣溫由溫度及濕度探針(HMP35C, Vaisala Inc., MA, USA)。所有資料儲存於資料收集器(23x data logger, Campbell Scientific Inc.)。

群落上方之 CO<sub>2</sub> 通量可由下式作偵測

$$F_c = K_c \frac{\partial C}{\partial Z} = K_c \frac{P M c (C_2 - C_1)}{T R (Z_1 - Z_2)}$$

其中， $F_c$ ：CO<sub>2</sub> 通量密度； $K_c$ ：CO<sub>2</sub> 渦流擴散係數； $Z$ ：高度。代入理想氣體定律後， $P$ ：大氣壓力； $M_c$ ：CO<sub>2</sub> 之分子量； $T$ ：溫度； $R$ ：理想氣體常數， $C_2 - C_1$  及  $Z_1 - Z_2$  分別為不同量測 CO<sub>2</sub> 差值及高度。

### 2. RUE<sub>CER</sub>：以二氧化碳交換率計算輻射利用效率

Bugbee & Monje(1992)認為生質量累積可經由群落上方二氧化碳交換率(Carbon dioxide exchange rate；CER)作持續偵測，同時包括在大面積田間碳素之 source、sink 及 feedback 機制的變化。

$$CER = \beta \sigma_w \rho_a (Cd - Cu) = P_c + R_{Ag} + R_s$$

其中， $P_c$  為光合作用速率； $R_{Ag}$ ：地上部呼吸率； $R_s$ ：土壤呼吸率。

土壤呼吸率因水稻生育大都處於湛水環境，Miyata *et al.*(2000)認為其 CO<sub>2</sub> 通量可忽略，而植體每日累積碳素(C)為  $P_c - R_{Ag}$ ，此數值可作為評估水稻輻射利用效率(Radiation use efficiency；RUE)的依據。

$$RUE = \frac{C}{IPAR}$$

IPAR 為水稻植被所截取輻射量，其計算式為

$$IPAR = PAR [1 - \exp(-K \times LAI)]$$

PAR 為植被上方輻射量； $K$ ：crop extinction coefficient，水稻平均值為 0.68(Campbell *et al.* 2001)；LAI：葉面積指數。

### 3. RUE<sub>DW</sub>：以乾物重累積量計算輻射利用效率

水稻生育期間於分蘗始期、分蘗盛期、最高分蘗、幼穗分化期、孕穗期、抽穗期、乳熟期、糊熟期及黃熟期等生育時期，每週分別自田間採四試驗區 40 叢之稻株，將各器官(葉、桿及穗)分別裝入紙袋，置於 100°C 通風乾燥箱 1-2 小時後，再以 80°C 處理至完成乾燥，秤量乾物重，並於收穫期測定產量與產量構成要素。

水稻葉面積是利用植冠分析儀(Licor 2000, Licor, Inc., Lincoln, NE, USA)所量測，從水稻移植起，固定每週至田區量測一次。儀器準確性之驗證是利用破壞性葉面積資料作比對，資料來源為農業試驗所之水稻豐歉試驗資料，每週取 20 棵稻株，將綠色葉片摘取下來，以葉面積分析儀(Licor 3000, Licor, Inc., Lincoln, NE, USA)分析每株之葉面積，再依行株距計算出葉面積指數(leaf area index；LAI)。2001 年二期作及 2002 年一期作利用植冠分析儀及葉面積儀所做結果的相關係數為 0.71，而在本研究中葉面積指數是指以植冠分析儀的數據為主。

光度量測部分：包括日射量計(pyranometer)：Eppley PSP (precision spectral pyranometer)，測定範圍 285-2800 nm。光子流計(quantum sensors)：Li-190SA，測定範圍 400-700 nm，每一感測器在使用前以光學輻射校正器(optical radiation calibrator；Licor 1800-02, Licor, Inc., Lincoln, NE, USA)校正參數。

## 結 果

一期作水稻由 2 月 25 日插秧至 6 月 24 日收穫為止共 120 天；二期作由 7 月 29 日插秧至 11 月 16 日收穫為止共 111 天。一期作生育期間氣象條件屬高溫及少雨，累積降雨量為 302 公厘，水田供水以灌溉方式為主；二期作生育期間氣象條件初期遭遇多次豪雨，整個生育期累積降雨量為 671.7 公厘，

較一期作之 302 公厘高出甚多，但在水稻生育中、後期，除 10 月 25 日有 7 公厘降雨外，其餘皆無降雨紀錄。水稻生育受氣象條件的影響，可由圖 1 乾物重累積情形說明，一期作生育較佳，單株乾重可達 76 g，二期作則僅 62 g，而由營養器官乾物重累積可反應到穗重，一、二期作單株穗重差值達 4.5 g，由此推估每公頃產量相差近 1000 kg，差異甚大。水稻葉面積指數對輻射利用效率的評估極為重要，圖 2 為一、二期作每週葉面積指數的變化，由於二期作生育初期因豪雨而生長不佳，葉面積指數最高值僅至 4.0，一期作初期雖遇缺水情形，但因灌溉供水正常，且光照充足及溫度適當，指數可超過 5.0。

由於本研究資料來源為田間實測結果，整個量測環境為開放式，各種氣象因素會影響葉片生理變化，尤其是氣孔導度的開啟程度，包括溫度、溼度、風速及光強，但就葉片固碳過程中，其速率之決定氣象因素仍以光強為主要因子。由圖 3 水稻群落二氧化碳通量與光合成光量子通量(PPFD)的相關性，兩者相關係數達 0.75，光子流量(quantum flux)越高則光合作用光反應所截取之能量越多，碳素進行卡爾文(Calvin)循環之速率加快，促使葉片內碳水化合物之累積增加。

過去相關研究較少探討日變化，一般以日平均值為單位，但就日間光強呈峰型波動，每一小時所能固定二氧化碳量並不相同。圖 4 是以通量計算輻射利用效率之日變化，以一期作抽穗期，連續七日之資料作整理，這段時間皆為太陽輻射量達 14 MJ 以上晴朗氣象條件。由圖中結果可知，清晨及傍晚(低光)之輻射利用效率最高，極端高值可達  $5 \mu\text{g CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$  以上，低點是在上午 8 點，隨後在正午有一高點。如果以水稻生育期為尺度，探討輻射利用效率，抽穗期是營養生長及生殖生長重要轉換期，抽穗期前所進行光合作用累積之乾物重用於植株本身及儲存養分；抽穗期後葉片所合成碳水化合物則多用於穀粒充實。圖 5 為抽穗期前後一個月期間之輻射利用效率變化情形，高點出現在抽穗期，此時也是葉面積指數最高值出現的時期，而當穀粒形成或充實期，葉片老化或黃化，葉面積逐漸減少，而對光強的反應也減弱，整體輻射利用效率明顯下降。

表 1 為不同葉面積指數等級下，不同計算方式所得到輻射利用效率之比較。 $RUE_{\text{CER}}$  值是由每日日間所吸收二氧化碳量除以太陽輻射量累積值，水稻除生育初期及後期外，一期作平均值為 1.93，二期作為 1.73，其中二期作在抽穗期後，因天氣晴朗，太陽輻射高，光合作用旺盛，因此  $RUE_{\text{CER}}$  值下降幅度較少。如果以破壞性取樣方式所得到植株乾物重，其輻射利用效率( $RUE_{\text{Dw}}$  值)可達每百萬焦耳產生 2.32 g 的乾物重，二期作則偏低，葉面積高值時之固定量為 1.50 g，生育初期僅為 1.03 g。

## 討 論

農業上所謂"效率"是指產出和投入的比值(Spedding *et al.* 1981)。農作物產出部分，一般以光合作用速率、乾物重累積量或穀粒產量為衡量基準，但投入部分則較為複雜，除植體本身遺傳特性或生理反應外，促進或減緩作物生長的因子，主要是以氣象環境為主，包括溫度、溼度、風速、光強、降水及二氧化碳濃度等，但其中關鍵氣象變數以降雨、溫度和太陽輻射量三者為主。降雨並非直接影響作物生長過程，但土壤水分卻直接影響產量，不論是因豪雨而造成淹水，或缺水而使作物乾枯；溫度影響作物發育的速率，可由積溫推估作物生育階段；太陽輻射量則直接提供能量供作物行光合作用，影響碳水化合物分配和生質量(biomass)累積。由圖 3 水稻群落之二氧化碳及光強之通量相關性，說明輻射量和光合作用速率間具有線性關係。Cooper(1970)估算入射輻射量中 45%之可見光譜可供光合作用使用，而產生 1 g 乾重約等於固定 4,250 卡化學能。由葉片固碳速率可推估乾物重累積量，甚至於產量，Jong *et al.*(1982)即指出夏威夷玉米穀粒產量可由輻射量變化解釋 78.5%產量的差異，由本研究結果可知一期作乾物重累積大於二期作，單株乾重相差 5 g(圖 1)，但一期作生育期所累積輻射量為 1,409 MJ，二期作為 1,404 MJ，僅相差 5 MJ，同時二期作之生育日數尚少於一期作 10 天，因此，如果僅以

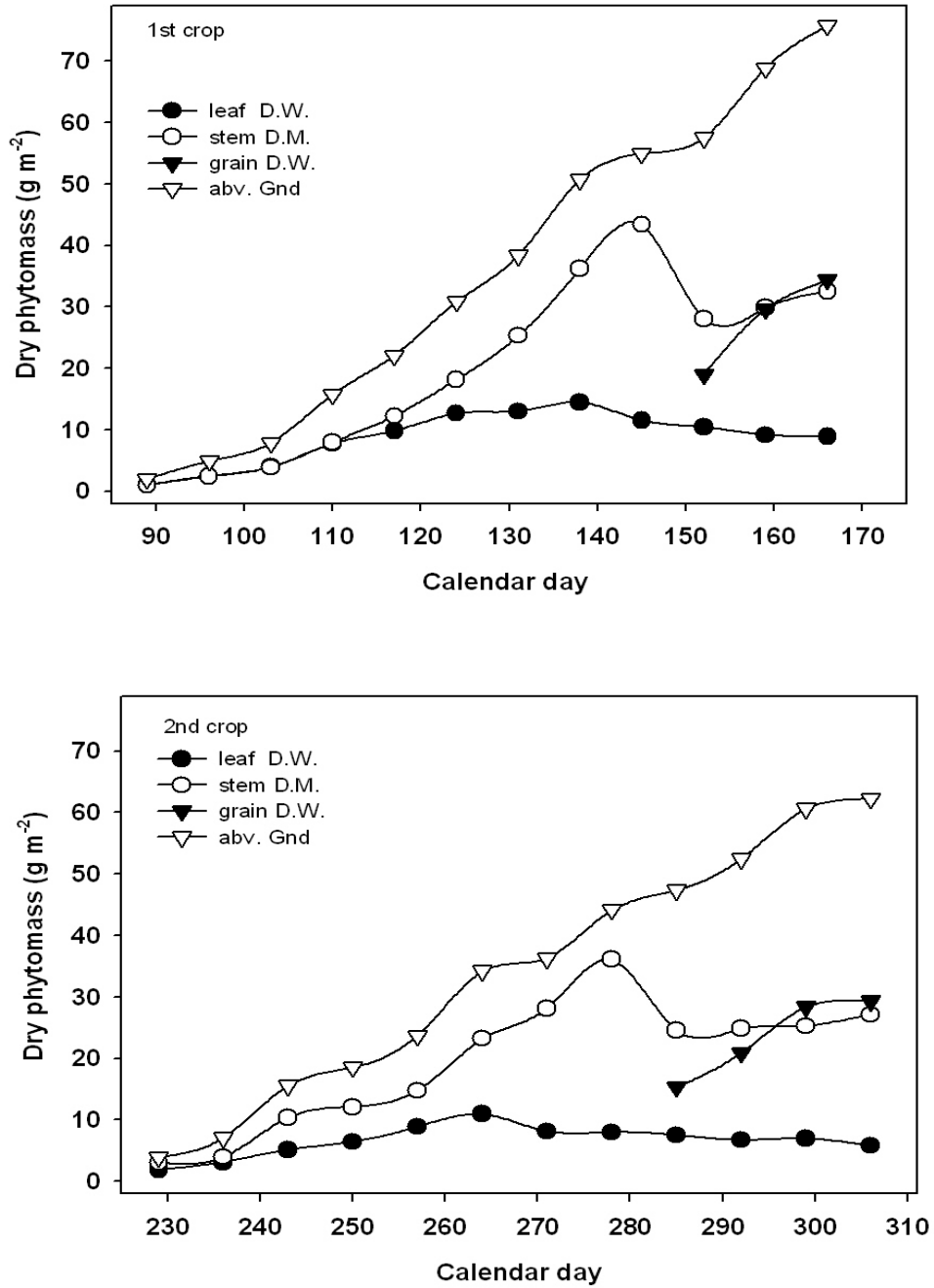


圖 1. 水稻一、二期作各器官乾物重累積值之變化。

Fig. 1. Changes in dry matter accumulation of rice during the 1<sup>st</sup> and the 2<sup>nd</sup> cropping seasons in 2004.

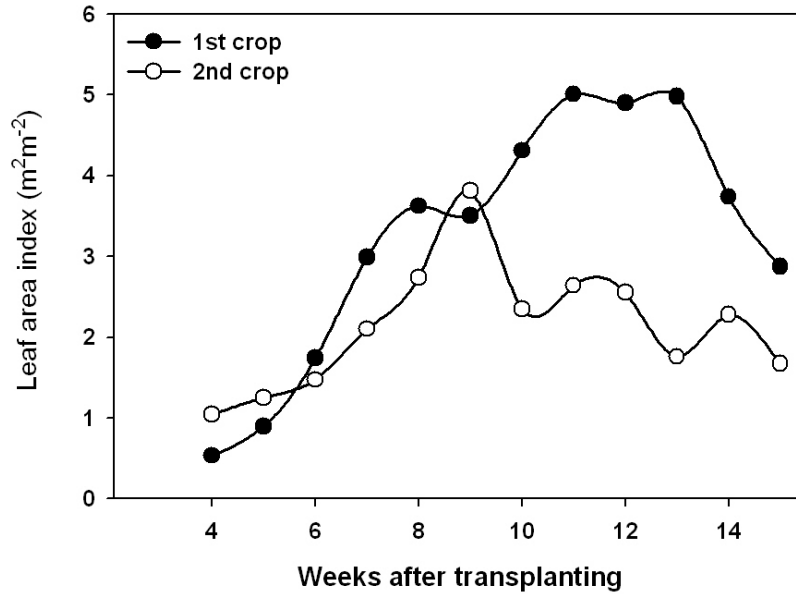


圖 2. 水稻一、二期作葉面積指數之變化。

Fig. 2. Changes of leaf area index of rice during the 1<sup>st</sup> and the 2<sup>nd</sup> cropping seasons in 2004.

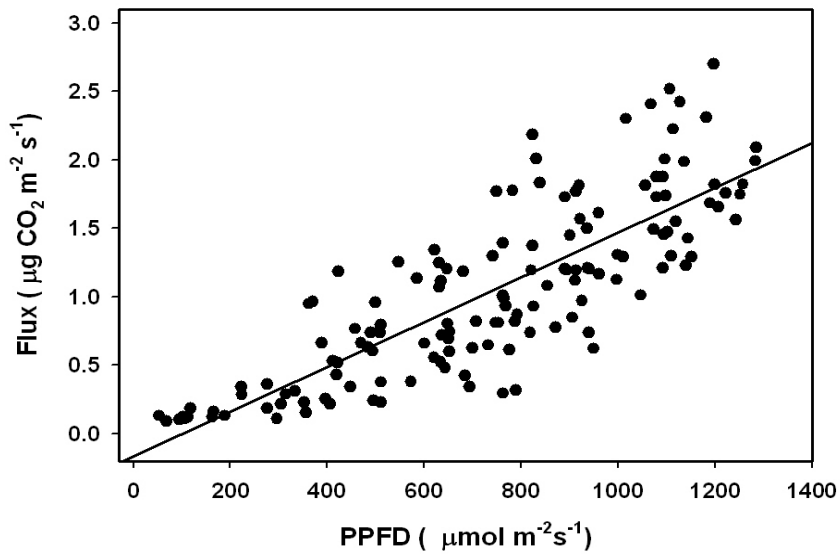


圖 3. 水稻田二氧化碳通量與截取光強之關係。

Fig. 3. Relationship between CO<sub>2</sub> flux and intercepted photosynthetic photon flux density in rice field during calendar days 120-133, 2004.

輻射量差異無法解釋乾物重之累積。事實上，葉片對光能的利用有一定範圍，在探討輻射利用效率之日變化(圖 4)中，說明輻射利用效率在低光環境較高，在正午雖然輻射量高，但輻射利用效率反而較低。當然正午時也受溫度較高影響，Kumar *et al.*(1996)研究發現溫度和 RUE 呈負相關，而由小麥試驗結果也認為溫度影響 RUE(Choudhury 2001)。Sands(1996)指出溫度影響 RUE 乃因溫度影響光合作用所致，高溫作物呼吸作用增加，整個固碳作用循環變慢，高溫也抑制光合活性(包括電子傳遞及酵素活性)，使光合作用速率減緩，和高輻射量的除值，使輻射利用效率下降。

水稻在開花後，整個光合作用產物的傳輸與利用有所改變，此將影響輻射利用效率的表現，尤其是在穀粒充實中、後期之輻射利用效率明顯下降(圖 5)。這在其他文獻也有相同結果，如 Horie & Sakuratani(1985)則認為 RUE 在水稻整個生育期並不一致，水稻開花後 RUE 明顯下降，主要是葉片氮素移至穀粒充實用(Salisbury & Ross 1992)，另一解釋認為是開花後行光合作用之有效面積下降所致(Gent & Kiyomoto 1992)。另外，不同物種產量的形成，和收穫產物的組成份有關，例如豆科作物生產高蛋白質和脂質的產物，如果以乾物重為基準所計算之輻射利用效率會較其他作物低。

表 1 為水稻不同生育階段之輻射利用效率變化，由葉面積指數作為生育階段劃分，可看出葉面積指數高之時期，輻射利用效率也較高，雖然，Horie & Sakuratani (1985)認為水稻 RUE 對葉面積指數改變僅小幅反應。Sinclair & Horie(1989)也認為 RUE 在葉面積改變時呈穩定，除了葉面積指數小於 1.0 外，也就是說，RUE 對 LAI 變化缺乏敏感性。但由本試驗結果說明，RUE 仍明顯受葉面積指數變動的影響。

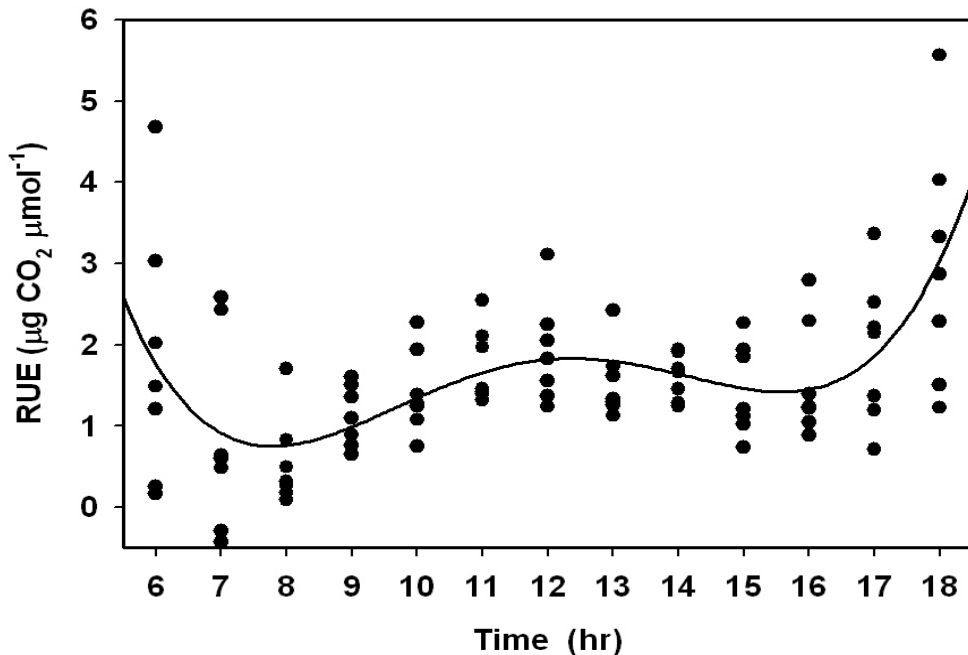


圖 4. 水稻孕穗期之輻射利用效率之日變化。

Fig. 4. Diurnal change of the radiation use efficiency during the heading stage of the 1<sup>st</sup> crop.

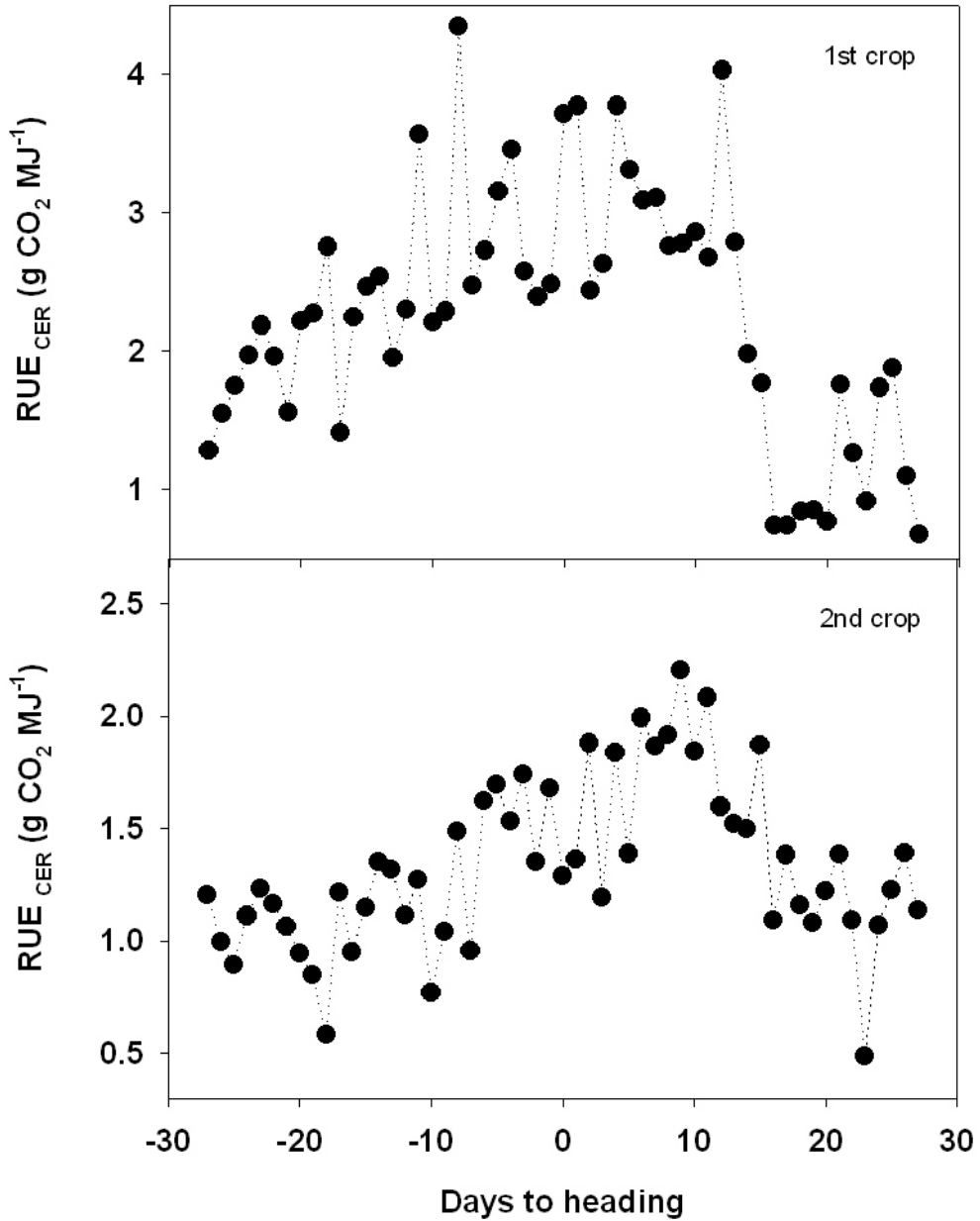


圖 5. 水稻抽穗期前後一個月之輻射利用效率之變化。

**Fig. 5.** Daily change of the radiation use efficiency during the one month periods before and after heading stage of rice in both the first and the second crops.

**表 1.** 比較不同輻射利用效率計算之差異，資料由田間破壞性乾物種取樣及 BREB 系統之二氧化碳交換速率計算而來  
**Table 1.** Comparisons of different radiation use efficiencies calculated by using field dry matter or CO<sub>2</sub> exchange rate obtained from field destructive sampling and BREB system.

| Season               | LAI <sup>z</sup> | RUE <sub>CER</sub> <sup>y</sup> | RUE <sub>DW</sub> |
|----------------------|------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 <sup>st</sup> crop | LAI<1            | 0.96±0.09                       | 1.75±0.16         |
|                      | LAI 1-3          | 1.87±0.07                       | 2.24±0.11         |
|                      | LAI 3-5          | 1.96±0.07                       | 2.32±0.16         |
|                      | LAI* <5          | 1.53±0.11                       | 1.11±0.19         |
| 2 <sup>nd</sup> crop | LAI<1            | 0.63±0.12                       | 1.03±0.18         |
|                      | LAI 1-3          | 1.76±0.11                       | 1.10±0.10         |
|                      | LAI 3-5          | 1.70±0.09                       | 1.50±0.13         |
|                      | LAI* <5          | 1.79±0.14                       | 1.41±0.15         |

<sup>z</sup> LAI=Leaf area index; \* post-heading.

<sup>y</sup> RUE=Radiation use efficiency.

Sinclair & Muchow(1999)所作分析整理的文章中，水稻輻射利用效率最高值為 1.39 g MJ<sup>-1</sup>，平均值為 1.1 g MJ<sup>-1</sup>，但由本研究中表 1 結果皆偏高，最高值可達 2.32 g MJ<sup>-1</sup>。作物輻射利用效率是由田間試驗結果所計算而得，田間影響作物生長的因子，尤其是有關光合作用速率更會直接影響，影響因素可概分為生物及非生物因素。生物因素指作物遺傳特性，尤其是光合作用速率的差異，但由和其他水稻栽培地區的比較，我國水稻產量並非屬於高產，品種選拔也非針對光合作用速率。至於非生物因素中，Luo *et al.*(1996)探討二氧化碳濃度對光合作用速率之敏感度分析，得到輻射和碳素利用效率非常緊密的結果。葉片光合作用速率對葉片氮素含量敏感，這是輻射利用效率變異很大的原因(Sinclair & Horie 1989)，當高葉片含氮量時，RUE 反應曲線呈飽和，其增加僅使 RUE 略增，在飽和值時，玉米約 1.8 g MJ<sup>-1</sup>，稻米 1.5 g MJ<sup>-1</sup>，大豆 1.3 g MJ<sup>-1</sup>，而當葉片含氮量偏低時，RUE 則對氮肥反應非常敏感。

Hammer & Wright(1994)認為影響 RUE 非生物因素中，以大氣穿透率影響最大，當由晴天轉為陰天時，RUE 以 0.4 g MJ<sup>-1</sup> 增加，而陰天增加散射組成比例，可使 RUE 增加 0.15 g MJ<sup>-1</sup>。事實上，Norman & Arkebauer(1991)認為太陽輻射中之散射及直射比值增加和 RUE 增加呈線性關係。Horie & Sakuratani(1985)水稻遮陰處理之 RUE，遮陰 46%之 RUE 為 1.66 g MJ<sup>-1</sup>，遮陰 72%之 RUE 為 1.98 g MJ<sup>-1</sup>，但未遮陰之 RUE 為 1.26 g MJ<sup>-1</sup>。在開頂溫室所得到 RUE 值較田間高 32%(Manderscheid *et al.* 2003)，除溫室內二氧化碳濃度較高外，溫室增加散射光之比值也是 RUE 增加的原因。在水稻栽培區中，我國地理位置雖亞熱帶，但因降雨日數或空氣污染因素造成太陽輻射偏低，同時雲量也有不同改變(姚等 1999)，加上對於直射及散射光比例在作物方面的探討甚少，或許因散射光比值偏高造成輻射利用效率較高，這部分仍有待更進一步的探討。

## 引用文獻

姚銘輝、盧虎生、朱鈞。1999。台灣地區日溫差之分析。中華農學會報 188：32-46。  
 Albrizio, R. and P. Steduto. 2003. Photosynthesis, respiration and conservative carbon use efficiency of four field grown crops. *Agric. For. Meteorol.* 116:19-36.  
 Angell, R., T. Svejcar, J. Bates, N. Z. Saliendra, and D. A. Johnson. 2001. Bowen ratio and closed chamber carbon dioxide flux measurement over sagebrush steppe vegetation. *Agric. For. Meteorol.* 108:153-161.

- Baldocchi, D. 1994. A comparative-study of mass and energy-exchange rates over a closed C<sub>3</sub> (wheat) and an open C<sub>4</sub> (corn) crop. II. CO<sub>2</sub> exchange and water-use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 67:291-321.
- Bugbee, B. and O. Monje. 1992. The limits of crop productivity. *Bioscience* 42:494-502.
- Campbell, C. S., J. Heilman, L. McInnes, K. J. Wilson, L. T. Medley, J. C. Wu, and D. R. Cobos. 2001. Seasonal variation in radiation use efficiency of irrigated rice. *Agric. For. Meteorol.* 110:45-54.
- Cheng, W., D. A. Sims, Y. Luo, J. S. Coleman, and D.W. Johnson. 2000. Photosynthesis, respiration and net primary production of sunflower stands in ambient and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations : an invariant NPP : GPP ratio ? *Global Change Biol.* 6:931-941.
- Choudhury, B. J. 2001. Modelling radiation- and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice. *Agric. For. Meteorol.* 106:317-330.
- Cooper, J. P. 1970. Potential production and energy conversion in temperate and tropical grasses. *Herbage Abstr.* 40:1-13.
- Dugas, W. A., M. L. Heuer, and H. S. Mayeux. 1999. Carbon dioxide fluxes over bermuda grass, native prairie, and sorghum. *Agric. For. Meteorol.* 93:121-139.
- Emmerich, W. E. 2003. Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. *Agric. For. Meteorol.* 116:91-102.
- Frank, A. B. 2002. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains. *Environ. Pollu.* 116:397-403.
- Gallagher, J. N. and P. V. Biscoe. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci.* 91:47-60.
- Gent, M. P. N. and R. K. Kiyomoto. 1992. Canopy photosynthesis and respiration in winter-wheat adapted and unadapted to Connecticut. *Crop Sci.* 32:425-431.
- Gosse, G., C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, M. Chartier, J. M. Allirand, and G. Lemaire. 1986. Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. *Agronomie* 6:47-56.
- Ham, J. M. and A. K. Knapp. 1998. Fluxes of CO<sub>2</sub>, water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source. *Agric. For. Meteorol.* 89:1-14.
- Hammer, G. L. and G. C. Wright. 1994. A theoretical analysis of nitrogen and radiation effects on radiation use efficiency in peanut. *Aust. J. Agric. Res.* 45:575-589.
- Hoogenboom, G. 2000. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agric. For. Meteorol.* 103:137-157.
- Horie, T. and T. Sakuratani. 1985. Studies on crop-weather relationship model in rice. I. Relation between absorbed solar radiation by the crop and the dry matter production. *J. Agric. Meteorol.(Japan)*40:331-342.
- Jong, S. K., J. L. Brewbaker, and C. H. Lee. 1982. Effects of solar radiation on the performance of maize in 41 successive monthly plantings in Hawaii. *Crop Sci.* 22:13-18.
- Kiniry, J. R. 1994. Radiation-use efficiency and grain yield of maize competing with johnsongrass. *Agron. J.* 86:554-557.
- Kumar, P. V., N. N. Srivastava, U. S. Victor, D. G. Rao, D. G., A. V. M. S. Rao, Y. S. Luo, Y., D. A. Sims, R. B. Thomas, D. T. Tissue, and J. T. Ball. 1996. Sensitivity of leaf photosynthesis to CO<sub>2</sub>

- concentration is an invariant function for  $C_3$  plant : a test with experimental data and global application. *Global Biogeochem. Cy.* 10:209-222.
- Manderscheid, R., S. Burkart, B. Bramm, W. Hans-Joachim. 2003. Effect of  $CO_2$  enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *Europ. J. Agron.* 19:411-425.
- Miyata, A., R. Leuning, O. T. Denmead, J. Kim, and Y. Harazono. 2000. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agric. For. Meteorol.* 102:287-303.
- Monteith, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Biol. Sci.* 281:277-294.
- Norman, J. M. and T. J. Arkebauer. 1991. Predicting canopy photosynthesis and light-use efficiency from leaf characteristics. p.75-94. *in: Modeling Crop Photosynthesis -From Biochemistry to Canopy.* CSSA Special Publ. No.19. Am. Soc. Agron. Crop Sci. Soc. Am., Madison, WI.
- Rochette, P., R. L. Desjardins, E. Pattey, and R. Lessard. 1995. Crop net carbon dioxide exchange rate and radiation use efficiency in soybean. *Agron. J.* 87:22-28.
- Salisbury, F. B. and C. W. Ross. 1992. *Plant Physiology.* Wadsworth Publishing Company, Belmont, California. 682 pp.
- Sands, P. J. 1996. Modeling canopy production. III. Canopy light-utilization efficiency and its sensitivity to physiological and environmental variables. *Aust. J. Plant Physiol.* 23:103-114.
- Shibles, R. M. and C.R. Weber. 1965. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybeans. *Crop Sci.* 5:575-577.
- Sinclair, T. R., Jr. L. H. Allen, and E. R. Lemon. 1975. An analysis of errors in the calculation of energy flux densities above vegetation by a Bowen ratio profile method. *Boundary-Layer Meteorol.* 8:129-139.
- Sinclair, T. R. and R. C. Muchow. 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.* 65:215-265.
- Sinclair, T. R. and T. Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency : A review. *Crop Sci.* 29:90-98.
- Spedding, C. R. W., J. M. Walshingham, and A. M. Hoxey. 1981. *Biological efficiency in Agriculture.* Academic Press, London. 300 pp.
- Tanaka, A. and J. Yamaguchi. 1968. The growth efficiency in relation to the growth of the rice plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 14:110-116.
- Tjoelker, M. G., J. Oleksyn, and P. B. Reich. 1999. Acclimation on respiration to temperature and  $CO_2$  in seedlings of boreal tree species in relation to plant size and relative growth rate. *Global Change Biol.* 49:679-691.
- Wall, G. W. and E. T. Kanemasu. 1990. Carbon dioxide exchange rates in wheat canopies. Part I. Influence of canopy geometry on trends in leaf-area index, light interception and instantaneous exchange rate. *Agric. For. Meteorol.* 49:81-102.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 106:85-100.
- Williams, W. A., R. S. Loomis, and C. R. Lepley. 1965. Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity interrelation to interception of solar radiation. *Crop Sci.* 5:211-219.

# Studies on Meteorological Resources Use Efficiency in Rice. I. Radiation Use Efficiency<sup>1</sup>

Ming-Hwi Yao<sup>2,3</sup>, Shou-Hung Chen<sup>2</sup> and Liang-Sheng Lien<sup>2</sup>

## Summary

Yao, M. H., S. H. Chen, and L. S. Lien. 2005. Studies on meteorological resources use efficiency in rice. I. Radiation use efficiency. *J. Taiwan Agric. Res.* 54:123-134.

The concept of radiation-use efficiency (RUE=carbon assimilated per unit intercepted photosynthetic photon flux density) is commonly used for analysis and modeling of crop growth. Field experiment was conducted in 2004 to evaluate RUE as a function of growth and development in paddy field of Agricultural Research Institute. Twenty-minute average of carbon assimilation rate was obtained from Bowen ration / energy balance (BREB) system, and light was measured with quantum sensors or pyranometers. Results indicated a high correlation between CO<sub>2</sub> flux and intercepted light flux during heading stage of rice, and the RUE values of rice ranged from 1.11 to 2.32 g MJ<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> in first crop, and 0.95 to 1.5 g MJ<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> in second crop. The mechanism underlying the higher values of RUE measured in this experiment, relative to those of other studies is not clear. However, the changes in diffuse radiation proportionality may insert a potential influence. Despite of this, we concluded that when RUE is a rice growth model parameter, it may be changed by varied LAI in different growth stages.

**Key words:** Rice, Radiation use efficiency, Flux.

- 
1. Contribution No.2231 from Agricultural Research Institute, Council of Agriculture. Accepted: September 23, 2005.
  2. Respectively, Associate Researcher, Assistance and Researcher, Agricultural Engineering Division, ARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.
  3. Corresponding author, e-mail: mhyao@wufeng.tari.gov.tw ; Fax: (04)23331673.